# ВСТУП

Часто для швидкої розробки прототипу радіоапаратури виникає необхідність абстрагуватись від розкиду параметрів комерційних зразків транзисторів. Найбільш очевидним шляхом вирішення цієї проблеми буде підбір транзисторів з необхідними параметрами. Це в свою чергу потребує засобів, що дозволяють швидко вимірювати, обробляти та відображати необхідні параметри.

Найбільш повною характеристикою транзистора є його вольт-амперна характеристика (ВАХ). За відомими ВАХ визначають решту параметрів транзистора: коефіцієнти передачі струму та напруги, вхідний та вихідний опір, напругу насичення та інші. Ці характеристики широко використовують для розрахунку транзисторних каскадів, для побудови лінійних та інших моделей транзисторів. Саме визначення ВАХ транзистору і буде основним завданням при розробці даної системи.

Розроблена система представляє собою програмний-апаратний комплекс призначений для вимірювання, обробки та відображення характеристик біполярних транзисторів, що дозволяє проводити вимірювання в автоматизованому режимі.

Сьогодні засоби обчислювальної техніки досягли значного розвитку. Їх використання для обробки та відображення інформації на багато дешевше ніж використання вбудованих апаратних засобів обробки та відображення результатів роботи вимірювальних пристроїв. Розробка тестування і найголовніше модифікація програмних засобів обробки та відображення потребує значно менше сил та засобів ніж при використанні для цього самостійно розроблених апаратних засобів. Тому в даній системі передбачається програмна частина для візуалізації отриманих результатів.

В більшості випадків характеристики транзисторів зображуються у вигляді так званих сімейств, де наводяться декілька кривих при фіксованому значенні одного із параметрів.

Хоча розробники апаратури звикли і майже не уявляють можливість роботи з іншими формами подання характеристик, із розвитком обчислювальної техніки та засобів обробки графіки з’являється можливість більш наочного відображення. Оскільки характеристики транзисторів є функціями двох змінних найбільш простим і наочним буде відображення таких характеристик у тривимірному просторі.

В даний час немає жодного подібного приладу, що виконує візуалізацію характеристик за допомогою тривимірної графіки, придатного для реального використання. Дана робота присвячена розробці саме такого приладу.

## ОГЛЯД АНАЛОГІВ

Даний розділ присвячений огляду аналогів. Такий огляд має не лише підтвердити доцільність розробки запропонованої системи а й дозволить вибрати успішні схемні рішення, що були реалізовані в інших подібних приладах.

Необхідно розглянути прилади різних років випуску та складності, від любительських схем до дорогих комерційних рішень.

Для розгляду обрано декілька випадкових приладів, про які легко знайти інформацію. Такої інформації цілком достатньо оскільки менш поширені прилади є або занадто дорогими і вузькоспеціалізованими, щоб проводити порівняння з ними, або застарілими і програють аналогам за основними показниками.

### Схема приставки до осцилографа

На рисунку 1 зображена схема характерографа опублікована в журналі раді в 1990 році. Схема призначена для перевірки малопотужних транзисторів обох структур. При цьому виводи транзисторів структури n-p-n включаються тільки в гнізда XS1–XS3, а транзистори структури p-n-p — в гнізда XS3–XS5.

Фіксовані струми бази для вимірюваних транзисторів отримують завдяки включенню в коло бази вагових (тобто кратних деякому значенню) резисторів R13 (R), R13 (2R), R11 (4R) за допомогою електронних ключів VT5, VT4 та VT3 відповідно. Електронні ключі, в свою чергу, керуються сигналами з виходу датчика DD1, тому в залежності від стану датчика отримують вісім значень струму бази.

Лічильник переключається імпульсами частотою 100 Гц — вони подаються на вхід C2 лічильника з колектора транзистора VT2. Сигнал подається на базу транзистора у вигляді пульсуючої напруги частотою 100 Гц з діода VD5.



Рисунок 1 — Схема характерографа

На діодах VD1–VD5 зібраний випрямляч для живлення кола бази вимірюваного транзистора та мікросхеми DD1. Напруга на мікросхему подається з параметричного стабілізатора виконаного на резисторі R1 та стабілітрона VD7 та підключеного до випрямляча. Інший параметричний стабілізатор виконаний на резисторі R2 та стабілітроні VD6, призначений для отримання напруги, що живить базове коло транзистора, що перевіряється, інакше кажучи він визначає струми через резистори R11–R13. Щоб ці струми можна було вимірювати в залежності від коефіцієнта передачі вимірюваного транзистора, в стабілізатор введено регулюючий транзистор VT1, на базу якого подається напруга з параметричного стабілізатора через змінний резистор R3. При зміні положення регулятора цього резистора змінюється напруга на резисторі навантаження R5, а значить змінюється частка струму в базовому колі вимірюваного транзистора при відкритті ключів на транзисторах VT3–VT5. Для обмеження струму в базових колах транзисторних ключів встановлені резистори R8–R10.

На діодах VD8–VD11 зібрано інший випрямляч, але без конденсатора фільтра на виході. Тому з нього знімається пульсуюча напруга частотою 100 Гц, що використовується для живлення кола колектор-емітер вимірюваного транзистора. Напруга з резистора R14, пропорційна струму колектора транзистора структури p-n-p або струму емітера транзистора структури n-p-n, подається на вертикальний вхід осцилографа. Оскільки в схемі включення транзистора за схемою зі спільним емітером струм колектора слабо відрізняється від струму емітера, виявилося можливим включити резистор R14 в коло емітера вимірюваного транзистора структури n-p-n. При такій схемі зміщення променя осцилографа від нульового положення відбувається вправо і вгору, тобто характеристики виходять зручними для читання.

Напрямок струму в колі бази в залежності від структури вимірюваного транзистора замінюються за допомогою перемикача SA1.

Змінну напругу на випрямлячі можна подавати лише з різних обмоток трансформатора. При чому обмотка, з якої знімається на напруга на діоди VD1–VD4, повинна мати якомога менший ємнісний зв'язок з мережевою обмоткою, інакше можуть з’явитись наводки на зображенні з частотою мережі. Найпростіше зменшити цей зв’язок за допомогою використання П-подібного магнітопроводу. Більш високочастотні завади, які можуть проникнути з мережі усуваються за допомогою конденсатора C2.

Вагові резистори R11–R13 обирають в залежності від необхідних струмів бази. Для вимірювання транзисторів малої потужності автором обрано «вагу» 20 кОм. При дослідженні більш потужних транзисторів вона можу бути збільшена. Але в будь-якому варіанті співвідношення опорів резисторів R13, R12 та R11 повинно бути 1:2:4 .

Основна превага наведеної схеми в її простоті, вона може бути зібрана навіть радіолюбителем. Однак вона не може функціонувати самостійно, вона потребує використання осцилографа для відображення отриманих результатів, що, в деяких випадках, робить використання схеми неможливим.

### Характерограф Л2-100 ТЕКО

Більш нове рішення запропоноване фірмою «ТЕСТПРИБОР», цифровий запам'ятовує характерограф напівпровідникових приладів Л2-100 ТЕКО (рис. 2), що позиціонується розробниками як сучасна заміна Л2-56.

Вимірювач параметрів напівпровідникових приладів Л2-56, який колись випускався вітчизняною промисловістю, здобув заслужене визнання фахівців завдяки своїй функціональності, зручності і простоті використання.

  
Рисунок 2 — Зовнішній вигляд характерографа Л2-100

Цифровий запам'ятовує характерограф напівпровідникових приладів Л2-100 призначений для візуального спостереження статичних вольт-амперних характеристик (ВАХ) напівпровідникових приладів, вимірювання напруги на їх електродах і струмів в їх колах.

Характерограф дозволяє досліджувати ВАХ напівпровідникових діодів, стабілітронів, біполярних і польових транзисторів, тиристорів, сімісторов і інших напівпровідникових приладі, а також оптоелектронних і пасивних компонентів.

Основні параметри характерографа Л2-100:

* Максимальний струм: 50A;
* Максимальна напруга: 5000В;
* Вбудований кольоровий TFT РК-дисплей (640 × 480 точок);
* Цифрова обробка і відображення ВАХ;
* Можливість збереження до 10 ВАХ в пам'яті;
* Можливість збереження і відновлення налаштувань приладу;
* Можливість порівняння досліджуваної ВАХ з зразком;
* Підключення до персонального комп'ютера через високошвидкісний USB-порт;
* Збереження побудованих ВАХ в одному з графічних форматів при підключенні до комп'ютера;
* Збереження даних в табличному форматі CSV або XLS для подальшої обробки;

Спрощена функціональна схема характерографа представлена на рис. . Основними вузлами приладу є: джерело живлення колекторного кола, генератор ступенів напруги (струму), підсилювач індикаторний по вертикалі, підсилювач індикаторний по горизонталі.



Рисунок 3 — Функціональна схема Л2-100

Для отримання на екрані характерографа сімейства ВАХ досліджуваного транзистора, в колекторне коло транзистора через обмежувальний резистор Rогр подається напруга від джерела живлення колекторної ланцюга. Від генератора кроку на керуючий електрод транзистора подається струм або напругу, що змінюється східчасто. При цьому в колекторному колі транзистора виникають імпульси струму, що створюють пропорційне падіння напруги на вимірювальному шунті Rш. Напруга між колектором і емітером транзистора і напруга на вимірювальному шунті надходять через відповідні підсилювачі в канали горизонтальної та вертикальної розгортки характерографа, які, у свою чергу, формують зображення сімейства ВАХ на екрані (рис. ).

Характерограф також оснащений високовольтним джерелом (на схемі не показаний), який дозволяє досліджувати ВАХ транзисторів при напругах до 5 кВ.

Даний характерограф цікавий також тим, що має можливість взаємодії з персональним комп’ютером. Для цього в комплект поставки входить спеціальне програмне забезпечення. На рис.  зображено зовнішній вигляд вікна програми драйвера для даного характерографа.



Рисунок 4 — Вікно програмного забезпечення

За допомогою персонального комп’ютера можна виконувати наступні функції. Здійснювати синхронне відображення ВАХ на екрані. Зберігати ВАХ разом з налаштуваннями приладу і результатами вимірювань з можливістю їх подальшого завантаження в характерограф. Роздруковувати ВАХ на принтері. Експортувати ВАХ в різноманітних графічних форматах, а також табличних форматах, зрозумілих популярним редакторам, що дозволяє проводити їх подальшу обробку .

Основним недоліком приладу для масового використання є його ціна. Слід відмітити, що прилад є самодостатнім і підключення до персонального комп’ютера є додатковою функцією, а для обробки і відображення використовується вбудований процесор і монітор. Вартість приладу можна зменшити якщо перекласти ці функції на ПК.

### Характерограф Type 576

Зовнішній Type 576 вигляд характерографа представлений на рис. 5.

  
Рисунок 5 — Зовнішній вигляд Type 576

Характерограф Type 576 динамічний напівпровідниковий тестер, який дозволяє проводити вимірювання та відображення характеристик різноманітних двох і трьох вивідних пристроїв, включаючи біполярні транзистори, польові транзистори, МОП-транзистори, кремнієві тиристори одноперехідні транзистори. Він дозволяє проводити різноманітні вимірювання з використанням схеми зі спільним емітером або спільною базою.

Прилад має в своєму розпорядженні генератори змінної та постійної напруги колектора в діапазоні від 0 до ± 1500 вольт. Генератор крок виробляє поточний крок струму або напруги, які можуть бути застосовані до будь-якого базового або емітерного виводу пристрою, що вимірюється. В режимі генерації струму можливо отримати значення струму з кроком від 5 мА до 2 А, а в режимі генерації напруги значення з кроком від 5 мВ до 40 В. Також струм або напруга може бути також отримана у вигляді коротких імпульсів. Калібрований крок зсуву дозволяє компенсувати вихід генератора кроку позитивним або негативним. Вертикальний дисплейний підсилювач дозволяє отримувати колекторний струм або струм витоку з максимальним коефіцієнтом відхилення 1 мА на поділку при проведенні вимірювань витоку. Горизонтальний підсилювач дозволяє вимірювати як колектора і напруги бази.

В таблиці наведено основні параметри приладу.

Таблиця 1. Параметри резисторів

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| Маса | 31 кг | | | |
| Висота | 40 см | | | |
| Ширина | 30 см | | | |
| Товщина | 60 см | | | |
| Матеріал корпусу | Алюміній | | | |
| Робочий діапазон температур | Від 0°C до +50°C | | | |
| Допустимі вібраційні навантаження | 15 хвилин уздовж кожної осі на 0,015  дюймовий з частотою змінюється від  10-50-10 c/s в 1-хвилинних циклів. | | | |
| Підключення до електромережі | Інструмент призначений для роботи від джерела живлення з його нейтральним або поблизу землі (земля) потенціалу. Він не призначений для роботи від двох фаз багатофазної системи. Він забезпечений шнуром живлення для підключення до джерела живлення. Третій провід підключений безпосередньо до приладової рами, і призначений для заземлення приладу для захисту обслуговуючого персоналу, відповідно до рекомендацій національних і міжнародних правил техніки безпеки. | | | |
| Напруга живлення | Від 115 В до 230 В | | | |
| Режим розгортки | Нормальний режим: змінний струм (на частотний характеристиці);  повне випрямлення змінного струму.  Режим постійного струму: позитивний або негативний. | | | |
| Режим пульсації постійного струму | Без навантаження не більше 2% напруги, або не більше 0,1% повного діапазону напруги. | | | |
| Точність значення напруги | Пікові напруги розімкнутого ланцюга на всіх  коливається в межах + 35% і -5% | | | |
| Діапазони значень напруг | 15 В | 75 В | 350 В | 1500 В |
| Максимальний піковий струм (Нормальний режим) | 10 А | 2 А | 0,5 А | 0,1 А |
| Піковий струм (Крок генератора в імпульсному режим) | 20 А | 4 А | 1 А | 0,5 А |
| Мінімальний опір | 0,3 Ом | 6,5 Ом | 140 Ом | 0,3 кОм |
| Максимальний опір | 65 кОм | 1,4 МОм | 6,5 МОм | 6,5 МОм |
| Точність кроку | 2% від загального значення напруги на виході, в тому числі значення зміщення, або 1% амплітудної установки перемикача, в залежності від того, що більше. | | | |
| Діапазон зміни кроку струму | Від 50 нА до 200 мА | | | |
| Діапазон зміни кроку напруги | Від 50 мВ до 2 В | | | |

Наведені електричні та екологічні характеристики дійсні для приладів, що працюють при температурі навколишнього середовища від +1°C до +40°C після початкового прогріву протягом 5 хвилин, коли попередньо відкаліброваних при температурі + 25°С ± 5°С .

Як видно з характеристик приладу до його недоліків можна віднести велику вагу та необхідність трьохфазного живлення, яке можна знайти лише у спеціальних виробничих приміщеннях. Однак він дозволяє проводити вимірювання широкого діапазону напівпровідникових приладів.

### Характерограф ЭРБИЙ-7107

Прилад (рис. ) призначений для випробувань, досліджень напівпровідникових двополюсників: резисторів, фоторезисторів, фотодіодів, термісторів, варисторів, наноплівок і т.п. Під управлінням спеціальної комп’ютерної програми прилад задає необхідні параметри випробування і вимірює контрольні параметри випробуваного зразка.

  
Рисунок 6 — Корпус приладу з вимірювальним стендом та персональним комп’ютером

Під час вимірюванні можна задати наступні параметри:

* Напруга вимірюваного двополюсника;
* Температура вимірюваного двополюсника;
* освітленість.

Після встановлення заданої температури і освітленості починається вимірювання. Прилад дозоляє вимірювати наступні параметри:

* струм через двополюсник;
* струм короткого замикання;
* фото е.р.с.

Передбачено перерахунок виміряного фотоструму в потужність випромінювання (мВт).

Прилад має високу точність завдання і вимірювання параметрів. Програмно-апаратний комплекс дозволяє автоматично знімати набір різних характеристик, одержуваних зі змінними, з обраним кроком, параметрами (напруга, освітленість, час).

У приладі реалізована функція захисту досліджуваного зразка від струмового перевантаження. Також прилад і програма можуть оснащуватися додатковими функціями: іншими характеристиками (наприклад, залежностями від температури) та ін.

Основні характеристики приладу:

* Струм живлення зразка (будь-якої полярності): від 10 нА до 200 мА;
* Напруга на виводах зразка (будь-якої полярності): від 100 мкВ до 5 В;
* Температура тримача: в діапазону зоні температур від 0 до +90°С (Або ширше, в залежності від типу нагрівача і охолоджувача): точність підтримки температури: 0,1°С, стабільність 0,01°С, швидкість нагріву і охолодження тримача: 30°С на хвилину, час встановлення температури: близько трьох хвилин від моменту включення струму мікрохолодильників Пельтьє;
* Струм живлення (будь-якої полярності) мікрохолодильників Пельтьє: від 0,1 А до 3 А; напруга: до 15 В;
* Діапазон перестрочування освітленості: 1:10000;
* Точність і стабільність підтримання освітленості: від 0,1% до 1%;
* Точність завдання і вимірювання напруги: від 0,1% до 1,3% від вимірюваної величини;
* Точність вимірювання струму: від 0,3% до 3% від вимірюваної величини.

Програмна частина призначена для керування приладом, вигляд вікна користувацького інтерфейсу показаний на рисунку .

  
Рисунок 7 — Віно програми для керування приладом

Вона забезпечує отримання параметрів зразка «в одній точці» (при фіксованому впливі), а також організовує отримання характеристик за допомогою зручного інтерфейсу.

Отримані програмою характеристики зберігаються в файли, роздруковуються на принтері і передаються в зовнішні програми обробки даних. Інформація про кожного двополюсника (задані параметри і отримані характеристики) зберігається в окремий файл, що дає можливість пізніше відновити роботу з кожним конкретним зразком .

Даний прилад є слабким аналогом розроблюваної системи, оскільки він призначений для вимірювання виключно двополюсників. Однак його варто розглядати оскільки він використовує персональний комп’ютер як засіб відображення.

Прилад має значні розміри, що видно з рисунку 6, і не має можливості використання тривимірної графіки для відображення отриманих характеристик.

### Характерограф TR-4805

Характерограф типу TR-4805 (рис. 8) є приладом загального призначення, що слугує для дослідження характеристик напівпровідникових приладів.

Прилад призначений для наочного дослідження напівпровідникових приладів: транзисторів малої та великої потужності, польових транзисторів, діодів, стабілітронів, тунельних діодів, тиристорів і т.д.

Він дозволяє легко і швидко вимірювати напівпровідникові прилади в лабораторіях та на виробництві.

За допомогою основного приладу можливо виконувати випробування двох елементів за допомогою порівняння при ручному переключенні параметрів в діапазоні 0–1000 В та 5 нА–2 А, при максимальному базовому струмі 200 мА. З використанням високоамперного адаптера типу 1576-3 (TR-4806-3) та високоамперного адаптера типу 1575-3 (TR-4806-3), що поставляються окремо в якості модулів розширення, діапазон вимірювань може бути розширений до 200 А колекторного струму та до 20 А струму бази (в імпульсному режимі).



Рисунок 8 — Передня панель характерографу TR-4805

Прилад також підходить для випробувань пасивних елементів, наприклад реле, перемикачів, роз’ємів при великих та малих струмах, до 200 А.

Розробники заявляють, що характерограф повністю зібраний на напівпровідникових елементах, та що використання інтегральних мікросхем підвищує надійність апарату. Прилад дуже легкий в обслуговування, що сприяє широкому використанню.

Основні характеристики приладу:

* Дозволяє вимірюваними одразу два напівпровідникові прилади та порівнювати результати при ручному переключенні;
* Живлення колекторного кола: 0–1 кВ;
* Полярність живлення: позитивна і негативна;
* Режим роботи: змінна напруга (випрямлена синусоїдальна напруга) постійна напруга;
* Максимальний струм колекторного кола: 2 А
* Потужність розсіювання: 0,1–0,5–2–10 Вт з автоматичною індикацією;
* Послідовний опір: 0–1,7 МОм;
* Захист від небезпечної напруги: на напівпровідникові прилади, що затиснуті у вимірювальні затискачі можна подавати напругу лише в закритому стані;
* Режим роботи генератора сходинок: дискретна напруга сходинки, циклічно повторювані сходинки напруги та струму;
* Кількість сходинок: 2–10
* Кроки струму: 0,2 мкА–20 мА;
* Кроки напруги: 0,1 В–2 В;
* Похибка при нульовому зміщенні: ±5%;
* Зміщення: не менше ±1 кроку;
* Перевірка струму заслону польового транзистора: за допомогою послідовного включення опору 100 кОм;
* Режим роботи підсилювача горизонтального відхилення: вимірювання напруги колектор-емітер або напруги база-емітер;
* Коефіцієнт відхилення: 0,1–100 В на поділку;
* Точність підсилювача горизонтального відхилення: ±5%;
* Режим роботи підсилювача вертикального відхилення: вимірювання колекторного струму;
* Коефіцієнт відхилення: 5 нА–0,2 А на поділку;
* Точність підсилювача горизонтального відхилення: ±5% ±10нА;
* Розмір зображення дисплея: 80х80мм (10х10 поділок);
* Положення зображення: звичайне для обох типів транзисторів;
* Необхідна напруга живлення: 100, 127, 200 В ±10% (з можливістю переключення);
* Частота живлення 50/60 Гц;
* Габаритні розміри: 252х262х343 мм;
* Вага 12,5 кг;
* Діапазон робочих температур:+10°С–+35°С .

Як видно з наведених характеристик даний прилад найбільш професіональними, оскільки в ньому передбачено декілька режимів вимірювання, можливість встановлення додаткових модулів, наприклад для вимірювання силових транзисторів зі струмами до 200 А. Можливо використання джерел живлення з різною напругою та частотою. Також даний прилад має можливість проводити вимірювання та порівняння характеристик двох транзисторів. Все це робить його більш досконалим ніж більшість перерахованих аналогів.

Згідно документації прилад випущений в 1978 році, а отже технології та елементна база, що використовується для виробництва, давно застаріли і потребують модернізації.

Слід також звернути увагу на значну вагу приладу, що не сприяє його поширеному використанню. Для зменшення ваги можна відмовитись від апаратної обробки та відображення характеристик і використовувати для цього засоби обчислювальної техніки.

### Висновки

В даному розділі розглянуто аналоги різних років випуску та ступеню комерційності, від саморобних схем опублікованих у спеціалізованих виданнях до великих професіональних приладів що потребують промислового живлення. Таке порівняння дозволить вибрати успішні проектні рішенні, що були реалізовані в інших подібних системах, та уникнути помилок допущених іншими розробниками.

Більш старі прилади використовують вбудовані системи відображення результатів вимірювань. Це призводить до здорожчання приладів та до ускладнення модернізації системи обробки та візуалізації отриманих характеристик.

Новіші використовують засоби обчислювальної техніки, зокрема і персональні комп’ютери, в якості підсистем обробки результатів та керування вимірюванням.

Однак жоден з розглянутих аналогів не використовує засоби тривимірної графіки для відображення характеристик вимірюваних напівпровідникових приладів. Вони використовують традицій систему відображення характеристик за допомогою сімейств. А більш примітивні взагалі можуть відображати лише одну характеристику за раз.

## ОГЛЯД ІСНУЮЧИХ РІШЕНЬ РОЗРОБКА АПАРАТНОЇ ЧАСТИНИ

### Вибір схемних рішень

#### Вибір мікроконтролера

Яскравими представниками восьми розрядних мікрконтролерів є вироби компаній Motorola (68HC05, 68HC08, 68HC11) і Zilog (Z8).

Motorola довгий час не надавала засобів, які дозволяють дешево і швидко почати роботу з її контролерами, що явно не сприяло їх популярності серед некорпоративних розробників. Однак слід зауважити, що закордоном мікроконтролери від Motorola займають більшість ринку.

Мікроконтролери фірми Zilog, заснованої колишніми працівниками Intel, яка ще недавно виглядала багатообіцяюче, не витримала гонки на ринку і сьогодні система команд Z8 виглядає досить застарілою.

Мікроконтролери PIC можна придбати за досить низькими цінами, що дозолило їм швидко захопити значну частину ринку. До того ж кристали від фірми Microchip виявились не гірші, а часто навіть кращі за більшість аналогів за продуктивністю і не потребують дорогого програматора.

Також у продажу можна знайти дешеві комплекти PICSTART, які містять все необхідне, для того щоб не маючи ні засобів, ні навиків роботи з PIC-контролерами, швидко створити та налагодити на ньому продукт.

Ці контролери мають хороші порти, а все інше зроблено досить незручно. Архітектура залишає бажати кращого, система команд виявилась вкрай обмеженою. Тим не менш PIC-контролери залишаються популярними в тих випадках коли потрібно розробити недорогу систему, яка не пред’являє серйозних вимог до її керування.

Контролери фірми Scinex мають 52 команди (PIC має 33), інструкції для роботи з пам’яттю, покращена архітектура, кожна команда виконується за один машинний цикл, що при інших рівних умовах швидше ніж у Microchip, до того ж їх частота досягає 100 МГц.

Така висока швидкість контролера дозволила його розробникам відмовитись від периферії — таймерів, лічильників, регістрів зсуву в портах вводу–виводу, — це все рекомендується реалізовувати чисто програмними засобами. А з апаратних контролер має лише швидке ядро, пам’ять та порти вводу/виводу.

Корпорація Atmel в 1996 році спричинила справжню революцію у світі мікроконтролерів, представивши своє сімейство чипів на новому прогресивному ядрі AVR. Більш продумана архітектура AVR, швидкодія яких перевищувала контролери Microchip, приваблива цінова політика сприяла відтоку багатьох розробників від найбільш популярних, на той час, PIC-контролерів.

Мікроконтролери AVR мають більш розвинену систему команд, що налічує до 133 інструкцій, продуктивність, близьку до 1 MIPS/МГц, Flash ПЗУ програм з можливістю внутрішньо схемного перепрограмування. Багато чипів мають функцію само програмування. AVR-архітектура оптимізована під мову високого рівня Сі. Крім того всі кристали підтримують сумісність «знизу в гору».

Величезну роль зіграла доступність програмного забезпечення і засобів підтримки розробки. У Atmel багато програмних продуктів, що розповсюджуються безкоштовно. Добре відомо, що розвинуті засоби підтримки розробки при освоєнні та ознайомленні з будь-яким сімейством мікроконтролерів відіграють не менш значну роль ніж самі кристали. Фірма Atmel приділяє багато уваги цьому питанню. Також популярності сприяє наявність надзвичайно вдалого, безкоштовного, середовища розробки AVR Studio для ОС Windows.

Для розробника-початківця важливим є той факт, що для програмування AVR можна обійтись взагалі без програматора. Найбільш популярним способом програмування цих контролерів є безпосереднє підключення до паралельного порту персонального комп’ютера .

#### Вибір способу з’днання з ПК

Оскільки обробка даних повинна відбуватись на персональному комп’ютері. Для цього в схемі повинен бути передбачений спосіб передачі інформації на ПК.

Один з найпростіших способів це передача через COM або LPT порти. Пересилати дані можна на пряму — без використання інтегрованих схем. Але вони майже вийшли з вжитку и практично не зустрічаються на сучасних ПК.

Альтернативою є USB-порт, який є одним із найбільш уживаних способів обміну даними з ПК. Однак протокол передачі дуже складний, що може сильно загальмувати проектування. Тому більшість розробників використовує готові рішення у вигляді інтегральних мікросхем. Таким чином для з’єднання з ПК можна використати один з наступних варіантів.

**Proiffilic Tehnologi PL2303X** — цей вузол є конвертором USB/послідовний порт для USB 1.1. Дескриптори вмонтовані у внутрішні ПЗУ (ROM — Read Only Memory). Для власного PID або ID вендора, знадобиться зовнішній EEProm, який може бути підключений за допомогою дводротової лінії. Додатки обмежені сигнальними лініями послідовного інтерфейсу. Версія PL2303HX RevD має OTR-ROM (One time Programmable) і дозволяє використання послідовних сигналів в якості 8 біт вводу/виводу.

**Silicon Labs CP2102/103** — на противагу Proiffilic має інтегрований EEProm с 1024 байтами та підтримує USB 2.0 Full Speed.

**MOSCHIP semiconductor MSC7820** підтримує два послідовних інтерфейси та передачу даних SIR-IrDA (інфрачервоний), а також USB 2.0. Також є можливість підключати зовнішній EEProm за допомогою двох інтерфейсів I2C.

Фірма **maxim** пропонує USB мікросхеми **Max3421** і **Max342**, які мають два прямих з’єднання мікроконтроллера з перетворювачем USB 2.0 (Full Speed). Крім USB має також SPI та вісім інших входів і виходів. Мікросхеми підготовлені в якості USB-хоста для USB-OTG. Оскільки послідовний інтерфейс ПК не підтримується, то мікросхеми можуть працювати без додаткового драйвера, через вбудований USB-драйвер Windows.

**FTDI FT232R** — мікросхема дозволяє проводити емуляцію послідовних і паралельних інтерфейсів (рис. 6). Так званий режим Big Bang Mode, який робить мікросхему досить цікавою для створення побутової апаратури. FT232R відкриває можливості для перетворення з USB в інші послідовні інтерфейси в так званій області MPSSE (Multi-Protocol Synchronous Serial Engine). За допомогою режиму Big Bang мікросхема FT232R дає доступ до ПК без використання додаткового контролера [7].

  
Рисунок 9 — Зовнішній вигляд FT232R

Перевагою використання мікросхеми FT232R є також достатня кількість літератури, та демонстраційних прикладів реалізацій на її основі.

В комплект входять драйвери для найбільш популярних операційних систем. Драйвер дає API (Application Programming Interface), що дозволяють створювати програмне забезпечення для кінцевого продукту з використанням мов програмування високого рівня (наприклад Visual Basic).

До недоліків використання окремої мікросхеми в ролі USB-драйвера можна віднести необхідність використання мікроконтролера, а також додаткова інтегральна мікросхема суттєво підвищує вартість виготовлення виробу.

**Вбудований модуль USB PIC18**. Фірма Microchip випускає контролери з модулем USB, який дозволяє проводити обмін інформацією з персональним комп’ютером (рис. 10). Мікроконтроллер PIC18F4550 підтримує обмін даними через протокол USB 2.0 в режимі Full Speed .

  
Рисунок 10 — Зовнішній вигляд USB PIC18

Превагою використання саме цього рішення є використання однієї мікросхеми для передавання і оброблення даних. Це спростить схему, що призведе до підвищення надійності і зниження вартості приладу. Microchip дає відкритий доступ до USB драйверів для операційної системи Windows. Драйвер верхнього рівня дає розробнику гранично простий API, що сильно спрощує написання прикладних програм для взаємодії з контролером.

До недоліків можна віднести відсутність перекладеної документації, особливо українською мовою. Такий мікроконтролер є досить потужним (а отже дорогим) і його ресурси не використовуватимуться повністю.

#### Вибір схеми керування напругою

Для побудови характеристик транзистора необхідно змінювати напругу в широких межах: від нуля до максимально допустимого, для даного транзистора, значення. Для більшості транзисторів це значення не перевищує 50 В. Отже схема повинна регулювати напругу в діапазоні 0..50 В.

Найбільш простим і логічним способом є використання цифро-аналогового перетворювача (ЦАП). Мікроконтролер PIC18F4550 не має вбудованого, але має достатньо портів вводу-виводу для під’єднання зовнішнього ЦАП.

Мікросхеми ЦАП, як правило мають більше декілька каналів та невисоку максимальну вихідну напругу. Знайти мікросхему, що задовольняла б усім вимогам (максимальна напругою 50 В, одно канальний) не вдалося. А найкращі знайдені результати були занадто дорогі для використання — сильно підвищували вартість виробу. Тому довелося відмовитись від використання мікросхеми ЦАП.

Замість ЦАП можна використовувати конвертори постійної напруги з керуванням за допомогою широтно-імпульсної модуляції (ШІМ).

Для живлення всієї схеми можна скористатись блоком живлення з ПК, який дозволяє отримати напругу 12 В та струм в декілька ампер. Тому спочатку була розглянута можливість використання конвертора з підвищенням напруги. Основною превагою якого є те, що для приладу не потрібно буде використовувати окреме джерело живлення.

Інтегральна схема MAX16824 — високовольтний інтегрований драйвер світлодіодів високої яскравості с діапазоном вхідної напруги від +6.5 В до +28 В. Особливістю ІС є наявність трьох виходів постійного струму з відкритим витоком, до якого підключається джерело напруги номіналом 36 В та номінальним вихідним струмом 150 мА, для кожної з трьох окремих ліній світло діодів. Струм можна задавати незалежно, за допомогою зовнішніх резисторів. Особливістю MAX16824 є наявність трьох ШІМ, виводи яких керують світлодіодами. Виводи ШІМ також використовуються для вмикання і вимикання кожної лінійки діодів (рис. 11).

Регулювати напругу можна безпосередньо за допомогою мікроконтролера, використовуючи для цього чотирьох розрядний послідовний інтерфейс з пропускною здатністю 2 Мбіт/с [9].

  
Рисунок 11 — Схема ввімкнення MAX16824

Перевагою використання мікросхеми є простота роботи з нею. А недоліки — її вартість і два непотрібні канали.

Наступним рішенням було зібрати конвертор на дискретних елементах, оскільки мікроконтролер PIC18F4550 має вбудований ШІМ.

Схема зображена на рис. 12 є найбільш простим і дешевим рішенням та видає напругу від 12 до 40 вольт. Але підвищувальний конвертор не може дати напругу меншу ніж на його вході, але для дослідження транзистора, характеристика при напрузі колектор-емітер в діапазоні від нуля до кількох вольт є найбільш цікавою. Отже в схемі даного приладу підвищувальний конвертор постійної напруги не може бути використаний [10].

  
Рисунок 12 — DC/DC Step-up convertor

Конвертора понижуючого типу на відміну від підвищувального може забезпечити напругу від нуля (фактично забезпечує від сотень мілівольт). Проте використання такого конвертора потребує окремого джерела живлення з вищою напругою.

Інтегральні схеми понижуючого конвертора через значну вартість не розглядалися.

В схемі на рис. 13. транзистор є ключем, для створення імпульсної напруги з постійної. При цьому амплітуда сформованих імпульсі рівна величині вхідної напруги. Для підвищення ефективності перетворення транзистор повинен перемикатись з високою частотою (чим вище частота тим ефективніше перемикання). В реальних схемах частота перемикання транзисторів може знаходитись в діапазоні від 80 кГц до 2 МГц.

  
Рисунок 13 — DC/DC step-down converter

Далі, отримана імпульсна напруга згладжується дроселем і електролітичним конденсатором. В результаті на виході створюється постійна напруга, але меншої величини. При цьому величина вихідної наруги буде пропорційна ширині імпульсів отриманих на виході транзистора. Якщо він відкриється на більший проміжок часу то енергія яку накопичує дросель збільшиться, що, в свою чергу, приведе до збільшення напруги на конденсаторі. І навпаки — при меншій тривалості відкритого стану транзистора напруга на конденсаторі зменшиться [11].

Важливим елементом схеми є діод. За його допомогою підтримується стум навантаження, що створений дроселем, в ті періоди часу коли транзистор закритий. Інакше кажучи коли транзистор відкритий струм дроселя і струм навантаження забезпечуються джерелом живлення, а дросель при цьому накопичує енергію. Після закриття транзистора струм навантаження підтримується за рахунок енергії, яку накопичив дросель. Цей струм протікає через діод, тобто енергія дроселя витрачається на підтримання струму навантаження.

Збільшити ККД можна якщо замість діода використовувати синхронний випрямляч (рис. 14), тобто замість діода знизу встановлюється такий самий польовий транзистор, він працює синхронно з першим але вони протифазні, тобто відкривається коли верхній польовий транзистор закритий і навпаки. Проте схема синхронізації двох силових транзисторів сильно ускладнюється тому для керування нею краще вирисовувати спеціальний синхронний інтегрований драйвер. Він має всі необхідні затримки між відкриттям і закриттям, щоб зменшити протікання небажаних струмів. Але додавання до схеми рішення ще однієї інтегральної схеми призведе до підвищення витрат на виробництво тому буде використана схема з одним польовим транзистором і діодом.

  
Рисунок 14 — Схема конвертора з синхронним випрямлячем.

Однак така схема ввімкнення польового транзистора не буде працювати. Річ у тім що N-канальний польовий транзистор повністю відкриється якщо на заслін подати позитивну напругу відносно витоку.

В даному випадку якщо на заслін подати позитивну напруги то транзистор почне відкриватись і напруга на витоку також підніметься. В результаті транзистор не може бути повністю відкритий або закритий.

Цю проблему можна вирішити за допомогою нескладної схеми, зображеної на рис. 15. Як видно силовим польовими транзистором (з права) керує біполярний драйвер. Однак він заведений відносно його Витоку. Транзистор що знаходиться зліва — малопотужний, він використовується для зсуву рівня. Сигнал на таку схему подається інвертований. Резистор Pull-Down потрібно поставити щоб схема не «висіла в повітрі». Принцип роботи схеми наступний: спочатку конденсатор CBOOT заряджається через діод DBOOT, напругою керування, оскільки транзистор закритий, на виході Витоку земля (після дроселя L іде навантаження, що заземляє Витік на час ввімкнення транзистора). Польовий транзистор зсуву рівня (зліва) навпаки, відкритий, щоб силовий польовий транзистор був закритий. Власне, це і є інверсія. Коли транзистор зсуву рівня закривається через резистор RLEVEL подається позитивна напруга на драйвер, який підсилює сигнал і подає «+» на Заслін силового транзистора. Він починає відкриватись і через деякий час відкривається повністю. Так як конденсатор CBOOT заряджений і прив’язаний до Витоку силового транзистора, то коли напруга на ньому зрівняються з напругою живлення то конденсатор CBOOT починає керувати силовим транзистором через драйвер. Виходить, що напруга в момент відкриття силового польового транзистора відносно землі дорівнює сумі напруги живлення та напруги на конденсаторі CBOOT. А діод не дозволяє напрузі виходити назад. Тому важливо знати різницю напруг і використовувати діод з запасом на потрібну напругу. Коли конденсатор CBOOT розряджається то починає відкриватись транзистор зсуву рівня, на драйвері починає падати напруга і одночасно з цим Виток силового транзистора знову замикається на землю [12].

  
Рисунок 15 — Схема керування напругою

Можна також додати до схеми резистор після **Стоку** керуючого польового транзистора. Це потрібно для того, щоб захистити транзистор рівня коли драйвер відкритий і його «земля» має більший потенціал ніж реальна.

  
Рисунок 16 — Остаточний варіант схеми

В результаті було створено схему (рис. ), працездатність якої підтверджено за допомогою моделювання в середовищі Multisim.

#### Вибір керованого джерела струму

В якості керованого джерела струму було обрано набір резисторів, що під’єднанні безпосередньо до виводів мікроконтролера. Хоча напруга на всіх виводах буде однаковою, але за рахунок різного опору буде протікати різний струм.

Для більш гнучкого регулювання струму можна вмикати декілька портів тоді опір буде визначатись паралельним з’єднанням резисторів, що підключені до цих виводів. Відповідно буде змінюватись і струм.

Але оскільки в даному випадку не вимагається висока точність перетворення то можна обійтись дешевим способом, без використання спальних мікросхем. На рис. 17 зображена схем 8-ми бітного ЦАП з використанням матриці резисторів R–2R. Основний недолік такої схеми в тому що потрібно 8 портів вводу-виводу. Похибка такого перетворення складає один молодший розряд.

  
Рисунок 17 — R-2R-ЦАП

Тут використовується тільки два номінали опорів, що відносяться як 2:1. Кількість резисторів рівна 2N. Резистивний дільник можна використовувати в якості ЦАП двома способами, в режимі напруги і в режимі струму (нормальний та інверсний режим). Головна перевага ЦАП з виходом за напругою в тому що вихідний імпеданс такої схеми залишається постійним. Друга перевага — відсутність ємнісних струмів у навантаженні. До недоліків схеми можна віднести те що джерело повинно мати низький імпеданс. По-друге для регулювання підсилення не можна використовувати резистор послідовно з джерелом [13].

Найбільша перевага для використання такої схем в тому що резистори мають однаковий номінал, що сильно спрощує його проектування.

### Аналіз структурної та принципової схеми

#### Аналіз структурної схеми

Структурна схема системи зображена на рис. 18.

  
Рисунок 18 — Структурна схема системи

Для вимірювання воль-амперних характеристик транзистора необхідно змінювати стум бази та напругу колектор–емітер, для цього в схемі передбачене кероване джерело струму (КДС) та кероване джерело напруги (КДН).

Отримане значення напруги через пристрій узгодження (УП) подається на аналогово-цифровий перетворювач (АЦП).

Схема керування (СК) визначає напруги колектор-емітер і струму бази транзистора. Також проводить первинну обробку даних перед відправкою на ПК. Далі отримані дані передаються на персональній комп’ютер для подальшої оброки.

Драйвер шини (ДШ) — низькорівневий програмний модуль призначений для взаємодії з апаратною частиною системи.

Отримані дані повинні піддаватись обробці та аналізу, за допомогою системи обробки (СО). Вона проводить перевірку та, в разі необхідності, корегування результатів. В основі такого аналізу лежить співставлення отриманих даних з математичною моделлю.

Модуль відображення (МВ) виконує власне побудову тривимірного зображення. Інтерфейс користувача (ІК) призначений для керування системою.

Згідно структурної схеми після проведення огляду існуючих рішень створено схему електричну принципову.

#### Аналіз електричної принципової схеми

Для вимірювання воль-амперних характеристик транзистора необхідно змінювати стум бази та напругу колектор–емітер. Це реалізовано за допомогою ЦАП та керованого джерела напруги.

Цифро-аналоговий перетворювач підключається до восьми розрядного порту-B мікроконтролера, виводів RB0–RB7. Кожен із цих виводів може давати напругу 5 В, якщо він знаходиться в стані логічної 1, або 0 В в стані логічного 0. Тобто, в залежності двійкового від коду, що встановлений на виводах порту ЦАП може задавати напругу від 0...5 В, з кроком 0,02 В. Похибка такого перетворювача складаю один молодший розряд — 0,02 В.

Резистор R18 необхідний, щоб задати струм бази. Його опір було розраховано виходячи з того, що для більшості малопотужних транзисторів складає приблизно від 100 мкА до 10 мА.

В схемі також передбачений зворотній зв'язок, який дозволяє точніше задавати базовий струм транзистора. Напруга бази знімається за допомогою вбудованого аналогово-цифрового перетворювача мікроконтролера, на виводі AN2, через дільник утворений резистором R24 та вхідним опором АЦП.

Кероване джерело напруги складається з польового транзистора VT4, діода VD2, конденсатора C6 та індуктивності L1. Керування джерелом напруги відбувається за допомогою зміни шаруватості імпульсів які подає мікроконтролер на заслін силового транзистора, який працює в режимі ключа. Транзистор в свою чергу відкриваючись і закриваючись на відповідні періоди часу створює з постійної напруги імпульсну, амплітуда якої приблизно рівна величині напруги живлення. Далі імпульсна напруга згладжується за допомогою дроселя та конденсатора і подається на схему вимірювань.

Транзистори VT1–VT3 необхідні для того, щоб правильно задавати режим роботи потужного ключа.

Для отримання точного значення напруги, що подається на схему вимірювань реалізовано зворотній зв’язок утворений дільником напруги, що складається зі 100 кОм резистора R22 та 10 кОм вхідного опору вбудованого АЦП. Як видно цей дільник має коефіцієнт ділення 1/10, тобто зменшує максимально можливу напругу з 50 В до необхідних 5 В.

Режим роботи вимірюваного транзистора задається резистором R26, який обмежує струм колектора коли транзистор відкритий. А R23 є частиною дільника, що вимірює напругу колектор–емітер.

Відображення режиму роботи комплексу відбувається за допомогою світлодіодів HL1 та HL2. Переший відображає поточний стан вимірювань і керується безпосередньо мікроконтролером. Він може знаходитись в одному з трьох станів:

* викинений — з’єднання з ПК не встановлено;
* ввімкнений — прилад готовий до роботи;
* блимає — запущено процес вимірювань.

Другий світлодіод контролює наявність напруги +60 В від зовнішнього джерела живлення, тобто світиться протягом всього часу роботи. Кожен світлодіод має послідовно ввімкнений резистор, що забезпечує коректний режим його роботи.

В схемі реалізоване апаратне скидання лічильника команд мікроконтролера при підключенні до ПК, оскільки він живиться від USB порту комп’ютера. За цю функцію відповідають резистор R27 і конденсатор C7.

Функції схеми курування та частково модуля передачі даних виконує мікроконтролер. Варіанти схем підключення та фрагменти коду прошивки для роботи з протоколом USB можна знайти в документації [14].

#### Алгоритм роботи мікроконторлера

Мікроконтролер отримує команди від ПК, виконує первинну обробку даних та керує процесом вимірювань.

Вимірювання починається після отримання команди з ПК. Перш за все мікроконтролер встановлює заданий з ПК струм бази транзистора за допомогою ЦАП. Далі він знімає значення напруги база-емітер UБ на виводі AN2 та вираховує струм за формулою:

,

де UБЕ — наруга між базою і емітером, яка знімаються за допомогою АЦП на виводі AN1.

Якщо розраховане значення струму відрізняється від заданого то проводиться корегування та знову проводиться вимірювання. Після встановлення необхідного значення, струм бази залишається незмінним протягом всього циклу побудови характеристики.

Далі мікроконтролер починає змінювати напругу на схемі вимірювання за допомогою вбудованого модуля ШІМ на виводі CCP1. При цьому контролер може контролювати цю напругу за допомогою зворотного зв’язку. Після завершення перехідних процесів він за допомогою АЦП реєструє напругу на виводі AN1 та розраховує струм колектора за наступною формулою:



Потім контролер збільшує напругу на заданий крок і процес повторюється знову, доки напруга колектор-емітер не досягне заданого значення. Величина кроку зміни визначається автоматично за крутістю характеристики.

Для уникнення простою під час очікування завершення перехідних процесів, мікроконтролер в цей час передає отримані дані на персональний комп’ютер. Дані для кожної точки складаються з пари чисел подвійної точності з плаваючою комою: наруга колектор-емітер у вольтах та струм колектора у міліамперах. В свою чергу програмне забезпечення ПК за цими даними будує характеристику та відображає її на екрані.

Увесь процес вимірювання триває не більше 20 секунд, після чого можна зберегти результат та проводити нові вимірювання.

### Розрахунки параметрів схеми

Розроблюваний прилад призначений для вимірювань тому для отримання точніших результатів значення параметрів деяких елементів потрібно точно розрахувати.

Коли вимірюваний транзистор відкритий повністю відкритий то його опором можна знехтувати. В цьому разі вся напруга буде падати на резисторі R26. Максимальний струм через транзистор не повинен перевищувати 100 мА. Тоді можна знайти опір резистора:



А потужність, що розсіюється на резисторі:



Для отримання значень напруги мікроконтролер має вбудовані аналогово-цифрові перетворювачі, які здатні реєструвати від 0 В до 5 В. Оскільки максимально напруга 50 В то потрібно використовувати дільник напруги з коефіцієнтом ділення 1/10. Такий дільник може бути утворений резистором R22 та вхідним опором АЦП контролера. Згідно з документацією на обраний мікроконтролер вхідний опір його АЦП дорівнює 10 кОм.





Максимальна потужність на резисторі:



Оскільки резистори R23 та R24 мають однакове функціональне призначення з резистором R22 то наведені для нього розрахунки справедливі і для них.

Задавати напругу, що визначає струм бази вимірюваного транзистора, можна за допомогою цифро-аналогового перетворювача зібраного на резисторах R1–R17. Він дозволяє регулювати напругу від 0 В до напруги на виводах мікроконтролера, що дорівнює 5 В, з кроком:



Для роботи малопотужних транзисторів потрібно щоб струм бази складав порядку сотень мікроампер. Тоді можна розрахувати значення опору R18, для забезпечення мінімального значення струму 100 мкА:



Максимальне значення струму бази досліджуваного транзистора при розрахованому значенні опору:



Потужність резистора R18:



Для забезпечення необхідного струму (30 мА) через індикаційні світлодіоди послідовно з ними вмикають резистори. Світлодіод HL1 потрібен для відображення сигналів мікроконтролера і буде підключений до його виводу, напруга на якому приблизно дорівнює 5 В. Звідки можна вирахувати необхідне значення опору резистора R19:



Потужність цього резистора:



Світлодіод HL2 призначений для індикації наявності живлення на схемі керованого джерела напруги. Тому вмикається безпосередньо до входу живлення, напруга на якому рівна 50 В, отже опір резистора R28 буде:



Потужність резистора:



Інші елементи є частинами готових схемних рішень, які використовуються в якості функціональних елементів приладу.

### Вибір елементної бази

#### Вибір резисторів

Розміри резисторів залежать від потужності, яку вони здатні розсіяти. Найпоширенішими є виконання на потужності 0,25 Вт, 0,5 Вт, 1 Вт, 2 Вт, 5 Вт. Також резистори відрізняються допусками: ±10%, ±5%, ±1%. Доцільно обрати резистори фірми Hitano, зовнішній вигляд та габаритні розміри зображено на рис. 19.

  
Рисунок 19 — Малопотужні резистори

Резистори R1–R8 мають номінальне значення опору 10 кОм. Вони входять до складу цифро-аналогового перетворювача, що задає струм бази, точність значення якого залежить від допуску резистора. Однак значення струму може корегуватись за допомогою зворотних зв’язків тому доцільно обрати ці резистори з досить великим допуском ±5%.

Резистори R9–R17, 20 кОм також є складовими ЦАП тому для них було обрано такі самі параметри.

Резистори R18 та R19 не потребують великої потужності і точності. Перший задає струм бази, який за звичай дуже малий, а другий обмежує струм індикаторний через світло діод.

Резистори R20–R24використовуються для вимірювань напруги у відповідних точка, в якості складових для дільників. Оскільки фактичне значення опору кожного з них може бути занесене в конфігурацію то вони також не потребують високої точності. Резистор R26 забезпечує рижим роботи вимірюваного транзистора. Якщо останній відкритий то резистор розсіюватиме значну потужність, яка відповідно до розрахунків становить приблизно 5 Вт. Його вигляд зображено на рис. 20.

  
Рисунок 20 — Потужний резистор

До таблиці 2.1 зведено всі параметри обраних резисторів.

Таблиця 2.1. Параметри резисторів

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| Позиційне позначення | Опір, кОм | Потужність, Вт | Допуск | Назва |
| R1–R8, R27 | 10 | 0,5 | ±5% | CR025SJTB-10K |
| R9–R17 | 20 | 0,5 | ±5% | CR025SJTB-20K |
| R18 | 0,2 | 0,5 | ±5% | CR025SJTB-200R |
| R19 | 0,16 | 0,5 | ±5% | CR025SJTB-160R |
| R20– R24 | 100 | 0,5 | ±5% | CR025SJTB-100K |
| R25 | 0,1 | 5 | ±5% | MOR500JTB-100R |
| R26 | 0,5 | 5 | ±5% | MOR500JTB-100R |
| R28 | 1,6 | 0,5 | ±5% | CR025SJTB-1R6 |

#### Вибір конденсаторів

Розміри та форма конденсаторів більшості випадків залежить від номінального значення ємності та напруги, яку вони можуть витримати. Найдоступнішими є конденсатори фірми Hitano. На рисунках 21 і 22 зображено вигляд звичайних та електролітичних конденсаторів відповідно.

  
Рисунок 21 — Конденсатор фірми Hitano

Більшість конденсаторів даної схеми підключені до сигнальних кіл, напруги 5 В буде цілком достатньо.

  
Рисунок 22 — Електролітичний конденсатор фірми Hitano

Конденсатори C5 та C6 заходяться в колах живлення, тому їх напруга повинна бути більшою за 50 В. До того ж ці конденсатори мають велику ємність 47 мкФ, тому їх доцільно обрати електролітичними.

В таблиці 2.2 наведено параметри обраних конденсаторів.

Таблиця 2.2. Параметри конденсаторів

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| Позиційне позначення | Ємність, пФ | Напруга, В | Допуск | Назва |
| С1 | 22·103 | 16 | ±20% | *MMK223J63* |
| С2, С3 | 22 | 16 | ±20% | *TCH2A220K-L515B* |
| С4 | 100·103 | 16 | ±20% | *SF1E224Z-L215B* |
| С5, C6 | 47·106 | 63 | ±20% | *ECR470M2AB* |
| C7, C8 | 100·103 | 16 | ±20% | *R15W104K1HL2-L* |

#### Вибір дроселя

Дросель L1 згладжує імпульсну напругу після силового транзистора. Згідно розрахунків індуктивність дроселя повинна бути близькою до 200 мкГн. Найближче значення 220 мкГн. До того ж дросель повинен бути розрахований на струм до 0,2 А. Тому було обрано RCH664NP-221K фірми Sumida, його вигляд зображено на рисунку 23.

  
Рисунок 23 — Дросель RCH664NP-221K

#### Вибір резонатора

Для більшої стабільності тактової частоти, що потрібна для підключення USB потрібно використовувати зовнішній резонатор, який повинен видавати частоту 20 МГц. Для цього можна використати кварцовий резонатор HC49S (рис. 24).

  
Рисунок 24 — Кварцовий резонатор HC49S

#### Вибір діодів

Діоди встановлені в силових колах схеми з максимальною напругою 50 В та струмом 100 мА. Для цього добре підходять діоди 1N4148 (рис. 25) витримують зворотною напругу 100 В то прямий струм 450 мА.

  
Рисунок 25 — Діод 1N4148

#### Вибір мікроконтролера

Мікроконтролер окрім основних функцій виконує також передачу даних на ПК. Тому однією з основних вимог є наявність вбудованого модуля USB. Контролер PIC18F2550 фірми Microchip, який має 28 виводів, що є цілком достатньо для даної схеми (рис. 26).

  
Рисунок 26 — Мікроконтролер PIC18F2550

#### Вибір транзисторів

Потужний польовий транзистор VT4 керує джерелом живлення 50 В, однак з огляду на те, що він працює в імпульсному режимі то необхідно обрати транзистор з деяким запасом. Транзистор IRF820 здатен працювати при напрузі стік-витік до 500 В та при струмі 2,5 А. Транзистор виконано в корпусі TO–220 (рис. 27)

  
Рисунок 27 — Корпус TO–220

Транзистори VT2 і VT3 повинні бути комплементарними, обрано BC639 — NPN та DC640 — PNP з максимальною напругою база-емітер 80 В та максимальним струмом колектора 1 А, які виконано в корпусі ТО–92 (Рис. 28).

  
Рисунок 28 — Корпус TO–92

Малопотужний польовий транзистор VT1 необхідний щоб задавати правильний режим роботи силового польового транзистора. Для цього було обрано BF245A з максимальною напругою 30 В та максимальним струмом 0,1 А.

### Розрахунок надійності

В даному розділі буде приведено розрахунок надійності схеми приладу за випадковими відмовами. Такий розрахунок виконується за схемою електричною принциповою та враховує не тільки інтенсивності відмов елементів кожного типу але й умови експлуатації в яких вони знаходяться, тобто вводиться поправочних коефіцієнтів які відображають механічні та кліматичні впливи на елементи. В цьому разі формула експлуатаційної інтенсивності відмов матиме наступний вигляд:



де *λ*Б — вихідна (базова) інтенсивність відмов елемента; *N* — кількість коефіцієнтів, що враховуються; *Кn* — *n*-тий коефіцієнт впливу.

В більшості випадків в розрахунку інтенсивності відмов присутній коефіцієнт, що враховує умови експлуатації, який буде однаковий для всіх елементів приладу:



Значення відповідних коефіцієнтів вибирається з довідників згідно умов технічного завдання, відповідно до яких:

Коефіцієнт умов використання К1 = 16, для наземної апаратури;

Коефіцієнт, що враховує температуру і вологість К2 = 1,2 для відносної вологості повітря 80% та температури +25°С;

Коефіцієнт, що враховує висоту використання апаратури К3 = 1,05 для висоти 0–2 км.

Оскільки на схемі є досить багато елементів одного типу, у яких буде однакова інтенсивність відмов то доцільно згрупувати елементи з однаковою інтенсивністю. Також необхідно зауважити що всі формули та значення коефіцієнтів взяті з довідника [15].

Електролітичні конденсатори C5, C6 мають допустиму напругу 63 В, а максимальна напруга на схемі 50 В, звідки можна розрахувати коефіцієнт навантаження та інтенсивність відмов для них:





Всі інші конденсатори в даній схемі використовуються в сигнальних колах, це означає, що максимальна робоча напруга не буде перевищувати 5 В, тоді їхній коефіцієнт навантаження буде:



А інтенсивність відмов:



Інтенсивність відмов кварцового резонатора розраховується так:



Малопотужні резистори, що працюють у сигнальних колах мають коефіцієнт навантаження який навіть у найгіршому випадку буде менший від 0,1. Тоді можна знайти інтенсивність відмов:



Згідно розрахунків максимальна потужність резисторів, що працюють у колах живлення не перевищує 0,25 Вт, а отже коефіцієнт навантаження буде приблизно 0,5.



Потужний резистор R26, як було розраховано, при відкритому транзисторі розсіює 5 Вт потужності, що є для нього максимальним значенням тому його коефіцієнт навантаження буде рівний 1.



Інтенсивність відмов мікроконтролера визначається за формулою для інтегральних мікросхем:



Коефіцієнт навантаження діода розраховується, як відношення максимального струму через нього в схемі до максимально допустимого струму. Максимальний струм на схемі через діоди не перевищить 200 мА, а допустимий — 450 мА:



Тоді можна розрахувати інтенсивність відмов для діодів VD1 і VD2:



Потужність силового транзистора VT4, що розсіюється на схемі становить приблизно 5 Вт, а максимальна 125 Вт тоді можна знайти коефіцієнт навантаження:



Тоді з урахуванням навантаження та робочої температури коефіцієнт КР = 0,1, тоді:



Таблиця 2.3. Параметри надійності груп елементів

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| Позиційні позначення | Базова інтенсивність відмов λБ 106, 1/год | Коефіцієнт навантаження КН | Робоча інтенсивність відмов λі·106, 1/год | Кількість елементів в групі Ni |
| С1-С4, C7, C8 | 0,01 | 0,31 | 0,05 | 6 |
| С5, C6 | 0,19 | 0,79 | 6,69 | 2 |
| D1 | 0,02 | 4,90 | 1,88 | 1 |
| VD1, VD2 | 0,10 | 0,44 | 0,90 | 2 |
| VT1-VT3 | 0,06 | 0,10 | 0,12 | 3 |
| VT4 | 0,09 | 0,12 | 0,21 | 1 |
| R1-R20,R27 | 0,04 | 0,10 | 0,08 | 21 |
| R21-R25 | 0,04 | 0,50 | 0,40 | 5 |
| R26 | 0,04 | 1,00 | 0,81 | 1 |
| ZQ1 | 0,03 | 1,00 | 0,50 | 1 |

Для малопотужних біполярних транзисторів, у яких допустима потужність складає 80 Вт, а робоча 35 Вт коефіцієнт навантаження буде:



За довідником підбираємо значення КР, який в при КН = 0,44 та робочій температурі +25°С для кремнієвих біполярних транзисторів складає приблизно 0,1. А інтенсивність відмов відповідно:



Для більшої наочності результати наведених вище розрахунків зведені до таблиці 2.3.

Сумарна інтенсивність відмов приладу визначається як сума інтенсивностей відмов кожного окремого елемента:



де *Ni* — кількість елементів в *і*-й групі.

Час напрацювання на відмову схеми відповідно буде:



Далі можна розрахувати імовірність безвідмовної роботи протягом часу t:



Графік залежності імовірності безвідмовної роботи від часу представлений на рисунку 29.

  
Рисунок 29 — Імовірність безвідмовної роботи