# 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.

## 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

## РОЗРОБКА ПРОГРАМНОЇ ЧАСТИНИ

Даний розділ присвячено розробці програмного забезпечення необхідного для керування системою. Воно складається з трьох відносно самостійних частини: програма для керування мікроконтролером, низькорівневий драйвер для взаємодії з приладом та модуль відображення. Кожна частина представляє собою окремий рівень роботи системи, вирішує певні задачі та має інтерфейс для взаємодії з іншими частинами.

### Налаштування середовищ розробки

Цей розділ було додано оскільки для розробки і налагодження необхідно встановити та спеціальним чином налаштувати декілька програмних продуктів, кожен з яких відповідає за розробку окремої частини системи.

Для симуляції роботи системи необхідно встановити наступні програмі засоби розробки:

* Середовище схемотехнічного моделювання Proteus ISIS в якому відбувається симуляція схеми апаратної частини приладу та розширення Proteus Virtual USB для організації взаємодії схеми з програмною частиною через USB.
* Інтегроване середовище MPLAB з компілятором C18 для компіляції програми керування мікроконтролером.
* Для розробки драйвера схеми на мові C++ використано Microsoft Visual Studio.
* Бібліотека для роботи з тривимірною графікою.

**Proteus** — система схемотехнічного моделювання, що базується на основі моделей електронних компонентів, прийнятих в PSpice. Відмінною рисою пакета PROTEUS VSM є можливість моделювання роботи програмованих пристроїв: мікроконтролерів, мікропроцесорів, DSP та інших. Бібліотека компонентів містить довідкові дані. Додатково в пакет PROTEUS VSM входить система проектування друкованих плат. Пакет Proteus складається з двох частин, двох підпрограм: ISIS — програма синтезу та моделювання безпосередньо електронних схем і ARES — програма розробки друкованих плат[XXXXX

<https://ru.wikipedia.org/wiki/Proteus_(%D1%81%D0%B8%D1%81%D1%82%D0%B5%D0%BC%D0%B0_%D0%B0%D0%B2%D1%82%D0%BE%D0%BC%D0%B0%D1%82%D0%B8%D0%B7%D0%B8%D1%80%D0%BE%D0%B2%D0%B0%D0%BD%D0%BD%D0%BE%D0%B3%D0%BE_%D0%BF%D1%80%D0%BE%D0%B5%D0%BA%D1%82%D0%B8%D1%80%D0%BE%D0%B2%D0%B0%D0%BD%D0%B8%D1%8F)>].

Схему принципову розроблено та налагоджено з використанням Proteus 7.6 фірми Labcenter Electronics.

Для моделювання передачі даних через USB необхідно використовувати Proteus Virtual USB.

Основна мета USB моделювання Proteus VSM виконувати повне моделювання мікроконтролерів, які мають периферійний USB модуль. Оскільки переважна більшість таких пристроїв мають периферійний USB модуль то Proteus VSM USB симулятор в даний час обмежується моделюванням лише USB пристроїв (тобто пристроїв, які підключаються до роз’єму USB на комп'ютері), і, зокрема до моделювання наступних класів USB пристроїв:

* Запам’ятовуючі пристрої (Mass Storage Device Class, MSD);
* Пристрої введення (Human Interface Device, HID);
* Пристрої зв’язку (Communications Device Class, CDC);

Підтримка додаткових класів (і додаткових варіантів мікроконтролерів) можуть бути додані в більш пізніх версіях в залежності від попиту[XXXXX

<http://www.labcenter.com/products/usb.cfm>].

Розширення Virtual USB не встановлюється разом з основним пакетом програм Proteus. Для цього необхідно запустити Installer.exe з папки USB Drivers, що знаходиться у папці зі встановленим програмним забезпеченням Proteus. Або викликати Пуск – Proteus 7 Professional – Virtual USB – Install USB Drivers. Якщо цього не зробити то середовище видасть попередження про те, що драйвер не встановлено.

При першому віртуальному підключенні пристрою до комп'ютера він запросить драйвер як і при реальному з'єднанні. Необхідно вказати шлях до папки з драйвером. При встановленні на Windows 7 можуть виникнути труднощі з встановленням, тому необхідно встановити драйвер через «Диспетчер пристроїв».

Також в операційній системі Windows 7 скомпільовану програму драйвер необхідно запускати з правами адміністратора, інакше можуть виникнути труднощі, що пов’язані з неможливістю встановлення з’єднання з пристроєм.

Слід пам’ятати, що файл схеми Proteus не зберігає в собі файл прошивки, а містить лише абсолютний шлях до нього, тому при відкритті схеми на іншому комп’ютері можна отримати помилку, пов’язану з відсутністю файлу за вказаним шляхом.

Для розробки програми прошивки для мікроконтролера з використанням мови високого рівня необхідно спеціальне середовище розробки. Таким середовищем є **MPLAB** фірми Microchip. Він має набір інструментів для розробки та налагодження програмного коду для керування мікроконтролерами, такі як компілятори, лінкувальники, засоби для слідкування за ходом виконання коду. Для кожної серії мікроконтролерів необхідно використовувати різні компілятори, тому MPLAB створений з окремих модулів, що дозволяє встановлювати різні інструменти, залежно від ситуації.

Для розробки даного проекту використано MPLAB 8.46, всі описані дії стосуються саме цього середовища. При відкритті проектів можуть виникнути наступні помилки.

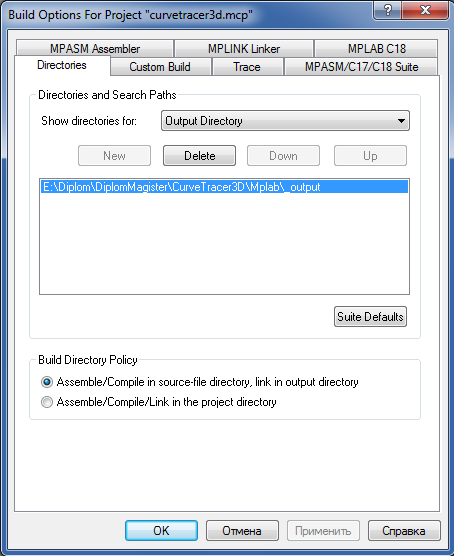
Найбільш поширеною помилкою при використані MPLAB є розміщення проектів у папках, шлях до яких які містять кириличні символи. При намаганні відкрити файли з таких проектів MPLAB видасть помилку: «Вказаний шлях до файлу не може бути знайдений». Про це слід завжди пам’ятати, зважаючи на те що це повідомлення є малоінформативним.

Інша можлива проблема полягає в тому, що MPLAB зберігає абсолютні шлях до заготовочних файлі. В найпростішому випадку в проекті використовуються заготовочні файли, що постачаються з компілятором та файли, що знаходяться в самому проекті. Розташування обох можуть відрізнятись на різних комп’ютерах тому необхідно переконатись, що в проекті вказані правильні шляхи.

Для цього необхідно клацнути правою кнопкою миші на проекті та вибрати пункт меню «Build options...», після цього відкриється вікно «Build options»(рис. ). У ньому необхідно вибрати вкладку «Directories». У полі «Show directories for:» вибрати значення «Include Search Path». Натиснути кнопку «New» та вказати шляхи до папки проекту та до файлів заголовків в папці з компілятором.

Також можуть виникнути проблеми пов’язані зі зміною версії компілятора. Часто можуть виникнути проблеми зі зміною конфігураційних констант. Наприклад, константа FCMEM в більш пізній версії замінена на FCMEN.

При необхідності вказати шляхи до компілятора лінкувальника та інших інструментів. Для цього необхідно клацнути правою кнопкою миші на проекті та вибрати пункт меню «Select Language Toolsuite...»

  
Рисунок 1 — Вікно «Build options»

Для відкриття проекту необхідно двічі клацнути на файл з розширенням .mcp або .mcw, в іншому випадку, якщо відкривати файл меню MPLAB можуть виникнути труднощі.

Для написання драйверів зазвичай використовують мову відносно низького рівня таку як С++.

З огляду не те, що операційна система Windows є найбільш популярною серед користувачів персональних комп’ютерів, а написання програм драйверів потребує взаємодії з операційною системою на низькому рівні інші операційні системи, для керування приладом, не розглядались. А отже для розробки драйвера керування приладом доречно використати середовище від того ж виробника що і операційна система — **Microsoft Visual Studio**.

Налаштування Visual Studio та запуск проектів не потребує особливих дій, окрім того, що при роботі під керуванням операційної системи Windows 7 запускати його необхідно з правами адміністратора.

Проект повністю сумісний з Microsoft Visual Studio 2008, або більш пізньою версією

### Розробка програми керування мікроконтролером

При роботі з мікроконтролерами сімейства PIC, який був обраний для керування апаратною частиною системи, для написання програм керування існує можливість використання лише двох мов програмування: мови низького рівня асемблера та мови високого рівня С.

Програма розроблена на мові асемблера виконується швидше та потребує менше ресурсів ніж аналогічна програма написана на С. Написання програми для мікроконтролера на асемблері дозволяє краще взаємодіяти із вбудованими апаратними засобами мікроконтролера.

Іще однією превагою використання асемблера на етапі розробки є те, що деякі середовища схемотехнічного моделювання, наприклад Porteus ISIS, дозволяє використовувати не тільки скомпільовані програми, а і вихідний текст програми на асемблері. Це може суттєво прискорити розробку простих рішень та відмовитись від встановлення спеціальних інтегрованих середовищ розробки.

Однак за таку оптимізацію доводиться платити більшими затратами часу на розробку програми. Оскільки для розробки на асемблері необхідно добре розуміти архітектуру конкретного мікроконтролера, для якого ведеться розробка.

Слід також зауважити, що асемблер для мікроконтролерів PIC значно відрізняється від звичного асемблера архітектури x86. Більше того кожна серія мікроконтролерів має власну реалізацію мови асемблера. Проте фірма Microchip оснащує свої продукти детальною документацією в якій описано як апаратні особливості архітектури так і про особливості взаємодії з ними, тому досвідченим розробникам апаратури використання асемблера не завдасть значних труднощів.

Іншим можливим рішенням є використання мови С, переваги якої складно переоцінити. На відміну від асемблера мова С більш зрозуміла для розробники та дозволяє в деякій мірі абстрагуватись від апаратних особливостей архітектури мікроконтролера. Що в свою чергу зробить вихідний код більш гнучким та спростить його перенесення на інший тип мікроконтролера. За роки існування цієї мови в інтернеті накопчелась велика кількість алгоритмів для рішення майже будь-якої задачі. Тому більшість розробників віддають перевагу саме цій мові.

Однак програмування на С потребує використання спеціальних інтегрованих середовищ розробки. На щастя фірма Microchip поставляє таке середовище, що розроблене спеціально для мікроконтролерів PIC.

Таким середовищем є MPLAB фірми Microchip. Він має набір інструментів для розробки та налагодження програмного коду для керування мікроконтролерами, такі як компілятори, лінкувальники, засоби для слідкування за ходом виконання коду. Для кожної серії мікроконтролерів необхідно використовувати різні компілятори, тому MPLAB створений з окремих модулів та дозволяє встановлювати різні інструменти, залежно від ситуації.

Незважаючи на всі переваги та недоліки кожної з мов програмування вирішальне значення мала наявність бібліотеки для роботи з ПК через USB.

Універсальний драйвер Microchip для роботи з USB під керуванням операційної системи Windows (Microchip General Purpose USB Windows), скдається з трьох частин: бібліотек для керування USB-модулем мікроконтролера, драйвер для операційної системи та DLL бібліотека, що полегшує програмну взаємодію з драйвером.

Разом з бібліотекою поставляються вихідні коди програм для мікроконтролерів різних типів, та демонстраційні приклади, з яких можна скомпілювати програми прошивки. Кожен приклад побудований таким чином, щоб можна було видалити файли, що не є частиною бібліотеки і використати його як основу для створення власних програм.

Один з таких демонстраційних проектів і було взято за основу. Він має вже готову архітектуру та налаштовану конфігурацію мікроконтролера. Інші засоби є досить простими і можуть бути з легкістю використані в будь-якому проекті.

Спершу слід визначитись з особливостями роботи готової частини, наприклад тактовим сигналом. Для роботи з USB потрібна висока стабільність тактових імпульсів, тому неможна використовувати звичайну конфігурацію. Для стаібізації тактової частоти до мікрокотролера підключений кварцовий резонатор з часттою 1 МГц. З урахуванням заданої конфігурацію мікроконтролера його тактова частота становить 5 МГц. Це дуже важливий параметр, оскільки від нього залежить частота переключення таймерів, а отже і заначення, що необхідно задати, щоб отримати потрібні інтервали часу.

Таймери та переривання

Керування напругою колектор-емітер відбувається за допомогою широтно-імпульсної модуляції (ШІМ), тобто результуюча напруга залежить від шпаруватості імпульсів що подаються на вхід схеми керування. Це створює необхідність у відносно високій стабільності генерованих імпульсів, яку не можна забезпечити при керуванні з основного циклу програми. В цьому випадку можна скористатись вбудованими таймерами мікроконтролера.

Використання таймерів, як і більшості периферійних модулів засновано на перериваннях. Переривання це механізм, що дозволяє перервати виконання програми та передати керування іншій ділянці коду. По завершенню виконання цієї ділянки керування буде передано туди де було перервано виконання основного коду. Це дозволяє швидко реагувати на настання певних подій.

Мікроконтролери сімейства PIC18 мають дворівневу систему переривань, тобто переривання можуть мати два пріоритети: високий і низький, відповідно і дві функції обробники. [<http://pro-diod.ru/programms/pic-micro/interrupt-v-pic18.html>]

Компілятор мови С надає досить зручний засіб для роботи з обробниками переривань. За документацією, щоб визначити функцію як обробник необхідно додати ключове слово *interrupt*, та за необхідності пріоритет (наприклад *low\_priority*) у визначення функції, яке матиме наступний вигляд: *void interrupt low\_priority  low\_isr (void)*. Це означає що функція буде викликана при появі переривання з низьким пріоритетом.

На жаль в нових версіях компілятора таке визначення обробників переривань не працює. Однак адреси потрібних функцій можна «вручну» занести у відповідні вектори переривань. Вектор — це адреса в програмній пам'яті, за якою відбувається автоматичний перехід при виникненні будь-якого дозволеного переривання.

Як було зазначено даний мікроконтролер має два типи переривань, а отже і два вектора:

* 0x08 — вектор переривань з високим пріоритетом;
* 0x18 — вектор переривань з низьким пріоритетом.

Слід пам’ятати, що вразі відключення пріоритетів то буде використовуватись лише один вектор 0x08.

Щоб налаштувати переривання необхідно дозволити переривання глобально та периферійні встановленням біті GIE та PEIE регістру INTCON відповідно та пріоритети встановленням IPEN регістру RCON.[<http://subscribe.ru/archive/comp.soft.prog.pic/200703/13210529.html>]

програмне керування зміною напруги

В минулому розділі вже було описано схемну реалізацію понижуючого перетворювача постійного струму на основі широтно-імпульсної модуляції. Тут буде наведено програмну реалізацію алгоритму керування ШІМ.

Найкращий варіант роботи керованого перетворювача постійного струму на основі широтно-імпульсної модуляції це використання апаратних засобі ШІМ (PWM, Pulse-Width Modulation) мікроконтролера. Для цього в мікроконтролері передбачено модуль CCP. Абревіатура розшифровується як Capture/Compare/PWM (Захват/Порівняння/ШІМ). Обрана модель мікроконтролера має два незалежних модулі CCP1 та CCP2. Однак вони, є не зовсім незалежними, оскіьки працюють на одній частоті та використовують однаковий спосіб підключення, проте є можливість задавати шпаруватість для кожного з них незалежно.

Для роботи модуля потрібно налаштувати виводи RC2 (CCP1) та RC1 (CCP2) на вихід, та активувати таймер 2. При використанні модулів CCP цей таймер буде рахувати такти та керувати довжиною імпульсів, а отже не доступний для інших функцій.[<http://picdevices.ru/eksperimentyi/pwm-dac-lpf-ili-kak-eto-po-nashemu-shim-tsap-fnch.html?doing_wp_cron=1464891333.4888598918914794921875>]

[<http://catcatcat.d-lan.dp.ua/skachat/primeryi-postroeniya-koda-programm-dlya-pic-kontrollerov/shirotno-impulsnaya-modulyatsiya/>]

Ініціалізація модуля CCP режимі ШІМ включає наступні етапи. Перш за все потрібно встановити режим роботи модуля та встановити відповідні виводи порту С на вихід. За режим роботи відповідають біти 0–3 регістру CCP1CON. Вибір режиму ШІМ відбувається встановленням бітів 2 та 3 (останні два ігноруються і можуть мати будь-яке значення).[<http://portal.tpu.ru/SHARED/p/PEST/pwm.pdf>]

За період імпульсів відповідає регістр PR2, що має 8 розрядів, а отже його значення не може перевищувати 255. Фактичне значення періоду розраховується за наступною формулою:

Ppwm = (PR2 + 1) \* 4 \* Tosc \* Nprescale,

де Ppwm — період імпульсів;

Tosc — тактова частота роботи мікроконтролера;

Nprescale значення переддільника таймера. Цей параметр може приймати три значення 1, 4 або 16. Для цього в біти 0–1 регістра T2CON потрібно встановити в значення 00, 01 або 11 відповідно.

За формулою на основі потрібної частоти імпульсів можна розрахувати значення PR2. Краще спершу взяти значення переддільника рівним 16 та розрахувати PR2, якщо значення перевищить 255 то взяти менше значення переддільника та повторити розрахунок. Використання регістра PR2 та таймера можна побачити на рисунку

Рисунок

Видно, що зміна значення напруги з високоги на низькие і навпаки відбувається коли коли таймер досягне деякого значення. Це означає, що частота імпульсів кратна частоті переключень таймера, який в свою чергу залежить від тактової частоти мікроконтролера. Очевидно, що підвищення частоти можна досягти зменшенням граничного значення лічильника. Однак таке зменшення призведе до того, що імпульс триватиме меншу кількість тактів і поділити його можна буде на меншу кількість частин. Цей параметр називається розрядністю ШІМ. Від дорівнює кількості біт, в яку можна записати число відношення частоти роботи мікроконтролера до необхідної частоти імпульсів. Наприклад, якщо тактова частота роботи мікроконтролера 20 МГц, а необхідна частота імпульсів 10 кГц то їх відношення буде 2000 або 11111010000, це 11 двійкових розрядів при максимальній можливій розрядності 10. Тому в цьому випадку розрядність ШІМ дорівнює 10. .[<http://picdevices.ru/eksperimentyi/pwm-dac-lpf-ili-kak-eto-po-nashemu-shim-tsap-fnch.html?doing_wp_cron=1464891333.4888598918914794921875>]

Забезпечення правильної роботи перетворювача не потребує конкретної частоти, тому було обрано максимальний період 255 та значення переддільника 1:1 в результаті буде отримано період:

Ppwm = (PR2 + 1) \* 4 \* Tosc \* Nprescale = 255 + 1 \* 4 1/(5 10е6) \* 1 = 20мкс = 0,2мс.

Це забезпечить досить високу частоту та максимальну розрядність ШІМ — 10 біт. При цьому значення шпаруватості може бути в діапазоні від 0 до 1023, отже можна змінювати вихідну напругу з кроком менше 0,1% від напруги живлення, що в даному випадку становить 0,05 В.

Отримання результатів вимірювання

Як відомо мікроконтролер є цифровим пристроєм та зазвичай працює з цифровими сигналами. Проте часто виникає необхідність отримувати дані з аналогових сигналів, як і в даному випадку. Не зважаючи на те, що існує велика кількість схем та інтегральних рішень аналогово-цифрових перетворювачів (АЦП) фірма Microchip намагається забезпечити якомога більше своїх мікроконтролерів вбудованим модулем АЦП, навіть найпростіші PIC10, що мають всього шість виводів.

Обраний мікроконтролер має 13 виводів (AN0–AN12) на які можна подавати аналогові сигнали. Однак від має лише один фізичний модуль АЦП, який підключається до цих виводів за допомогою мультиплексора.

Найважливішою характеристикою АЦП є його розрядність, вона показує з яким мінімальним кроком можна вимірювати величину аналогової напруги, що можна визначити за наступною формулою:

dU = Uadc / 2^Nrozr

де Uadc — опорна напруга АЦП

Nr — кількість розрядів АЦП.[<http://pro-diod.ru/programms/pic-micro/acp-v-pic18f45xx-analogo-cifrovoe-preobrazovanie.html>]

Обраний мікроконтролер має 10 розрядів АЦП, отже мінімальний крок аналогового сигналу при використанні напруги живлення як опорної становитиме приблизно 5 мВ.

Роботу модуля АЦП контролюють три восьми розрядні регістри ADCON0, ADCON1 та ADCON2. Перший дозволяє вимикати модуль та обирати який вивід буде підключено до нього. Другий встановлює джерело напруги та режими роботи виводів (аналоговий чи цифровий). Третій контролює час перетворення та частоту тактів модуля.[<http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/39632e.pdf>]

Більшість бітів можна встановити як показано в демонстраційних прикладах, однак деякі потрібно розглянути детальніше.

Біт ADFM регістру ADCON2 визначає вирівнювання результату. Річ у тім, що 10 розрядів результату роботи АЦП знаходяться у 16-ти розрядному регістрі ADRES (ADRESH та ADRESL) і їх потрібно там певним чином розмістити (рис).

Рисунок

Якщо планується використовувати лише 8 розрядів результату, наприклад коли не потрібна велика точність вимірів або опорна напруга не досить стабільна рекомендується встановити лівостороннє вирівнювання (ADFM = 0), а результат брати з регістру ADRESH. Якщо ж планується використовувати всі 10 біт результату то краще вирівняти в право та скористатися ADRESH і ADRESL як одним 16-розрядним регістром.

Інша особливість використання модуля АЦП полягає в тому, що для своєї роботи він використовує переривання. Це потрібно, оскільки процес отримання цифрового значення сигналу займає певний час. В цей час мікроконтролер може виконувати інші дії, а коли перетворення буде завершено буде викликано переривання. Тож при ініціалізації модуля необхідно також настроїти переривання: біт ADIE регістру PIE1 дозволяє переривання від АЦП, біт ADIP регістру IPR1 встановлює пріоритет переривань від АЦП, біт ADIF регістру PIR1 скидає прапорець переривань.

Для запуску власне перетворення потрібно встановити біт GO\_DONE регістру ADCON0 та скинути ADIF, щоб переривання не було викликано одразу.

Щоб переконатись, що переривання викликане саме завершенням аналогово-цифрового перетворенням у функції обробнику потрібно перевірити, що встановлено одночасно ADIF та ADIE регістру PIE1, та скинути перший, що переривання не було викликано повторно.

Загальний алгоритм роботи мікроконтролера

Вище було описано налаштування та принципи роботи кожної необхідної частини окремо. А тут буде показано як вони взаємодіють в процесі вимірювання.

Під час запуску апаратної частини відбувається ініціалізація вказаних модулів з описаною конфігурацією.

При отриманні сигналу до початку вимірювань відбувається скидання всіх лічильників та встановлення значення напруги колектор-емітер і струму бази у початкове значення. Відбувається розрахунок початкового значення шпаруватості імпульсів для отримання необхідної напруги. Це значення контролюється за допомогою зворотнього зв’язку. Через резистивний дільник воно подається на вивід AN1. Коли значення напруги між двома запусками АЦП з даного виводу буде менше ніж задана похибка — вважається, що напруга встанвлена та починається вимірювання струму колектора. Після отримання цього значення напруга збільшується на заданий крок та все повторюється.

Кожна характеристика це досить великий об’єм даних. Максимальна розрядність ШІМ генератора 10, тобто можна отримати 1024 значення напруги. Розрядність керованого джерела струму 8, тобто 256 значень. Отже поверхня може містити

Нт = 2 Ншім \* 2 Нкдс = 1024 \* 246 = 262144 точок

Кожна точка точка представлена числом з плаваючою комою з одинарною точністью, тобто 4 байти на точку. Отже в результаті:

Спов = Сфлоат \* Нт = 4 \* 262144 = 1048576 байт = -= 1Мб

Обрана модель мікроконтролера має всього 2048 байт пам’яті даних, є неможливим збереження всіх результатів. Всі виміряні дані потрібно одразу ж предавати на ПК. Це можливо зважаючи на те, що всі використовувані модулі (таймери, АЦП та ШІМ) працюють у фоновому режимі і мікроконтролер може виконувати передачу на ПК між перериваннями.

Слід зазначити, що прийом та передача інформації на ПК має обмеження в часі, якщо дані небуде передано за відведений час то робота буже завершено з помилкою. Тому перед початком передачі потрібно бідкючити глобальні переривання (INTCON.GIE = 0), а після завершення дозволити.

Коли лічильник напруги досягне максимального значення він буде скинутий, а лічильник струму збільшений на заданий крок струму та процес повторено.

Для індикації стану приладу використано світлодіод, що буде блимати ти на протязі всього циклу вимірювань. Для цього використано апаратний таймер 0 мікроконтролера.

### Розробка драйвера

Для взаємодії з апаратною частиною системи необхідно спеціальне програмне забезпечення — драйвер. Який візьме на себе функції передачі сигналів керування та отримання результатів вимірювань.

Драйвери взаємодіють с досить примітивними пристроями, що керуються мікроконтролерами, в яких може бути досить складна організація пам’яті та порядку байтів при передачі даних. Іноді вони навіть мають можливість працювати з окремими бітами. Отже для написання драйверів слід використовувати мову досить низького рівня, обов’язково з можливістю прямої взаємодії з пам’яттю. Саме такою мовою є C++.

З огляду не те, що операційна система Windows є найбільш популярною серед користувачів персональних комп’ютерів, а написання програм драйверів потребує взаємодії з операційною системою на низькому рівні інші операційні системи, для керування приладом, не розглядались. А отже для розробки драйвера керування приладом доречно використати середовище від того ж виробника що і операційна система — Microsoft Visual Studio.

Для забезпечення принципу модульності драйвер приладу буде реалізований у вигляді окремої бібліотеки, яку можна буде підключити до програми для виводу тривимірної графіки, написаної на мові більш високого рівня. Таким чином драйвер та апаратна частина стануть лише джерелом даних для системи відображення. А саму систему відображення можна використовувати окремо, для виводу збережених раніше даних.

Принцип модульності зобов’язує організовувати програми як сукупність невеликих незалежних блоків, які називаються модулями, структура і поведінка яких підкоряються певним правилам. Використання модульного програмування дозволяє спростити тестування програми і виявлення помилок. Апаратно-залежні частини можуть бути жорстко відділені від інших частин, що покращує мобільність створюваних програм.

Модуль — функціонально закінчений фрагмент програми. У багатьох мовах (але далеко не обов'язково) оформляється у вигляді окремого файлу з вихідним кодом або пойменованої безперервної її частини. Деякі мови передбачають об'єднання модулів в пакети.[MODULE

<https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%9C%D0%BE%D0%B4%D1%83%D0%BB%D1%8C%D0%BD%D0%BE%D0%B5_%D0%BF%D1%80%D0%BE%D0%B3%D1%80%D0%B0%D0%BC%D0%BC%D0%B8%D1%80%D0%BE%D0%B2%D0%B0%D0%BD%D0%B8%D0%B5>]

Створення бібліотеки динамічного зв’язування (Dynamic Link Library, DLL) необхідно виконати деякі дії.

В середовищі Microsoft Visual Studio необхідно створити новий проект типу Win32. У вікні створення проекту вибрати «Пустий проект». Після компіляції буде отримано DLL, бібліотеку імпорту (.lib) та бібліотеку експорту (.exp).

Перш за все необхідно створити заготовочний файл з сигнатурами методів, який може бути використаний при підключенні DLL з бібліотекою імпорту. В цьому файлі повинні бути описані усі сигнатури функцій, що мають бути викликані зовнішніми програмами.

Всі ці функції мають бути помічені спеціальними ключовими словами. Наприклад, якщо функцію з сигнатурою «*void Start();*» необхідно викликати з іншої програми то записати так «*extern "C" \_\_declspec(dllexport) void Start();*». Так само необхідно записати функцію і в фалі з реалізаціє.

Перший варіант використовувати DLL разом з бібліотекою імпорту (.lib), яка виходить при компіляції проекту бібліотеки. Цей метод дуже простий, так як в такому випадку потрібно просто включити заголовки бібліотеки та саму бібліотеку в проект та просто викликати необхідні функції.

Це буде чудово працювати, якщо є заголовки і бібліотека імпорту знаходиться в каталозі, прописаному в бібліотечних шляхах. Перед запуском програми, потрібно переконатись, що DLL знаходиться в каталозі, прописаному в системній змінній PATH або в тому ж каталозі, що і виконуваний файл, інакше отримаєте повідомлення про помилку. Однак якщо декілька програм використовують цю DLL, потрібна всього одна її копія, що лежить, наприклад, в каталозі Windows\System.

Другий варіант — завантажити DLL "на льоту". Це потрібно в разі, якщо DLL створено сторонніми розробниками і немає заголовків і бібліотеки імпорту.[

<http://www.xserver.ru/computer/sredaprogr/msvc/2/>

XXXXXXXXXX DLL]

На відміну від першого, де бібліотека підключається ще на етапі компіляції, тобто якщо відповідні файли не знайдено буде видано помилку компіляції і проект не буде побудований. Тут бібліотека та всі її функції завантажуються динамічно на етапі виконання програми.

Другий метод є більш гнучким, оскільки він дозволяє завантажувати бібліотеки вибірково, або при виконанні деяких умов. Таким чином можна організувати динамічне завантаження лише тих частин програми які необхідні в даний момент користувачу, і вивантажувати коли вони вже не потрібні. В той же час як при першому варіанті всі бібліотеки гарантовано будуть завантажені перед початком виконання.

Далі описано функції, що необхідно викликати та кроки, що необхідно заробити щоб завантажити DLL-бібліотеку. Всі описані функції є функціями прикладного інтерфейс Windows — WinApi, тому для їх використання необхідно включити заготовочний файл windows.h.

Для завантаження бібліотеки потрібно викликати функцію LoadLibrary. Вона приймає єдиний аргумент — строку зі шляхом до бібліотеки, яку необхідно завантажити. Шлях може бути абсолютний, відносний або містити тільки назву файлу. В останньому випадку пошук буде проводитись спочатку в каталозі з виконуваним файлом, а потім у всіх каталогах що опсані в системній змінній PATH. Виклик функції поверне дескриптор бібліотеки типу HMODULE або значення NULL, якщо бібліотеку не знайдено.

Тепер бібліотека є завантаженою в пам’ять і доступна для використання. Далі потрібно отримати адреси функцій, які будуть викликатись з неї. Для цього використовують функцію GetProcAddress, яка отримує на вхід дескриптор бібліотеки та ім’я функції яку необхідно завантажити. Функція GetProcAddress повертає значення типу FARPROC, це і є вказівник на потрібну функцію. Отримане значення за допомогою приведення типів необхідно привести до правильної сигнатури. Найпростіший варіант це визначити новий тип вказівника на функцію з необхідною кількістю та типами параметрів та типом значення, що вона повертає, визначити змінну цього типи та виконати приведення до нього. Тепер з отриманою змінною вказівника можна поводитись як зі звичайною функцією — викликати з необхідними їй списком параметрів та отримувати результат її роботи.

Якщо функцію з заданим ім’ям не знайдено в бібліотеці то GetProcAddress поверне значення NULL. Це свідчить про те, що сталась помилка і подальше використання бібліотеки може привести до невизначеної поведінки всієї програми, оскільки з великою імовірністю завантажено неправильну бібліотеку. Тому необхідно контролювати отримане значення вказівника і вразі помилки переривати роботу програми.

Системна функція FreeLibrary вивантажує бібліотеку коли вона вже непотрібна. В якості параметру вона отримує дескриптор бібліотеки, що необхідно вивантажити, та повертає логічне значення, що показує чи успішно була вивантажена бібліотека.

Технічно функція FreeLibrary не вивантажує бібліотеку, а лише зменшує кількість вказівників на неї. Власне вивантаження з пам’яті буде виконано лише тоді коли лічильник вказівників досягне нуля. Це так званий механізм підрахунку посилань. Він дозволяє економити ресурси системи коли одну бібліотеку використовують декілька додатків. Перший виклик LoadLibrary завантажує бібліотеку в пам’ять, а всі інші лише збільшують лічильник посилань.

Тому дуже важливо викликати FreeLibrary кожен раз при завершенні програми, навіть при аварійному, лічильник посилань ніколи не дійде до нуля і бібліотека не буде вивантажена, аж до перезавантаження комп’ютера. В цей час її файл неможливо пермітити, перейменувати або перекомпілювати проект, оскілки файл вважається зайнятим.

З DLL бібліотеки можна викликати лише окремі функції. А при розробці програмного коду бібліотеки в об’єктно-орієнтованому стилі весь функціонал розділений між об’єктами, які досить часто повинні бути в пам’яті на протязі всієї роботи програми. Виникає ситуація при якій об’єкт повинен бути створений перед викликом функції та видалятись після кількох викликів різних функцій. Навіть якщо ствоювати об’єкт «ліниво», тобто при кожному виклику кожної функції перевіряти чи сторений об’єкт, якщо ні то створити його, залишається невирішеною проблема видалення.

Найбільш простий варіант це в бібліотеці створити функції, що необхідно вилки до початку роботи та після її завершення. Але може ускладнити використання бібліотеки, оскільки розробники часто забувають викликати такі функції, особливо ті що пов’язані з очисткою ресурсів, адже їх влив не роботу програми не завжди очевидний.

Для вирішення цієї проблеми можна додати спеціальну функцію DllMain, яка буде автоматично викликана при виникненні однієї з описаних нижче подій. Щоб визначити, що це за подія необхідно порівняти значення параметру fdwReason з однією з наступних констант:

* DLL\_PROCESS\_ATTACH — бібліотека була завантажена в віртуальний адресний простір поточного процесу, як результат запуску процесу або виклику LoadLibrary.
* DLL\_PROCESS\_DETACH - бібліотека вивантажена з віртуального адресного простору процесу, що викликав через невдалу спробу завантаження або тому, що лічильник посилань досяг нуля.
* DLL\_THREAD\_ATTACH — Поточний процес створює новий потік. Коли це відбувається, система викликає функцію точки входу всіх бібліотек DLL, що в даний час приєднані до цього процесу. Виклик виконується в контексті нового потоку.

DLL\_THREAD\_DETACH — Потік завершився повністю. Якщо DLL зберігає вказівник на виділену пам'ять, потрібно використовувати цю можливість, щоб звільнити її. Система викликає функцію точки входу всіх завантажених в даний момент бібліотек DLL з цим значенням.[XXXXXX DLLMAIN

<https://msdn.microsoft.com/ru-ru/library/windows/desktop/ms682583(v=vs.85).aspx>]

Найбільш цікавими є перші дві події, тому, що саме при їх виникненні можна виконати ініціалізацію і очитку ресурсів в середині бібліотеки.

При додавані до порожнього проекту функції DllMain можна отримати помилку, що така функція уже визначена. Щоб позбавитись від неї необхідно просто іще раз перекомпілювати проект.

Для роботи з USB використано вбудований USB-модуль мікроконтролера PIC18F2550. Розробка драйвера «з нуля» потребує багато часу та ресурсів. Тому для полегшення розробки було викорстано вихідні коди універсального драйвера фірми Microchip для операційної системи Windows (Microchip General Purpose USB Windows).

Він включає бібліотечні файли, що містять вихідні коди програм для мікроконтролерів різних типів, та демонстраційні приклади, з яких можна скомпілювати програми прошивки для різних видів пристроїв. Головний приклад побудований таким чином, щоб можна було видалити файли, що не є частиною бібліотеки і використати його як базу для створення своїх програм.

Для спрощення розробки програм керування пристроями зі сторони персонального комп’ютера в комплект поставки входить DLL бібліотека для безпосередньої взаємодії з описаною вище частиною бібліотеки для мікроконтролера. В ній є описано функції для з’єднання з пристроєм, прийому та передачі даних на пристрій та закриття з’єднання.

Ця бібліотека не взаємодіє безпосередньо з контролером шини USB. Взаємодія відбувається через спеціальну частину драйвера, що також входить в комплект поставки. Щоб успішно встановити з’єднання з пристроєм при першому підключенні коли операційна система запитає драйвер необхідно вказати шлях саме до паки з цією частиною драйвера.

Разом з бібліотекою поставляються демонстраційні приклади, які показують особливості використання кожної її частини. Всі приклади легко перекомпілювати, що сильно спрощує використання бібліотеки навіть з урахуванням того, що документація є лише англійською мовою.

Структура програмного коду цієї частини системи організована в об’єктно-орієнтованому стилі. Такий підхід є більш гнучким оскільки він дозволяє розділити функціонал програми між окремими класами. Кожен клас містить дані і функції призначені для рішення однієї конкретної підзадачі. Наприклад якщо клас використовує бібліотеку то він сам її завантажує, використовує та вивантажує коли це йому необхідно, так щоб іншим класам, які використовують перший не було необхідності знати про це.

Все що відомо про клас це його інтерфейс, тобто набір функцій, які можна викликати у об’єкта цього класу, щоб змусити його робити деякі дії.

В термінах об’єктно-орієнтованого програмування функції класу називаються методами. Резниця в тому, що метод виконує дії для конкретного об’єкта. Тобто в метод на відміну від функції неявно передається вказівник на цей об’єкт. Надалі для позначення функції-члену класу буде використовуватись термін метод.

USBDevice основний клас бібліотеки драйвера. Він є об’єктним відображенням підключеного пристрою з яким можна обмінюватись інформацією, тобто до якого можна підключитись, послати запит та отримати відповідь. Всі інші реалізують більш конкретний функціонал драйвера. Цей клас є найбільш низькорівненвим, він безпосередньо взаємодіє з універсальним драйвером, що розроблений фірмою Microchip, за допомогою засобів, що надає операційна система Windows.

Слід зауважити, що даний клас є абстрактним тобто не представляє конкретного пристрою і має лише функціонал доступний для будь-якого USB пристрою, що може бути розроблений за подібною схемою. Додавати реалізацію функціоналу для конкретного пристрою можна за допомогою механізму наслідування. Додавати реалізацію функціоналу означає додати можливість відправляти конкретні повідомлення, що можуть бути оброблені на стороні мікроконтролера.

Ініціалізація пристрою проходить в два етапи. На першому завантажується бібліотека з універсальним драйвером та проводиться пошук в ній необхідних для роботи функцій. На другому проводиться пошук підключених до USB-порту пристроїв. В разі якщо файл бібліотеки, одну або більше функцій з неї не знайдено або немає підключених пристроїв буде отримано повідомлення про помилку та викликане аварійне завершення роботи, а всі спроби послати повідомлення будуть завершуватись з помилкою. Для спрощення обидві ці дії об’єднані в одному методі Connect, однак для більшої гнучкості кожну с цих дій можна викликати окремо.

Всі помилки, що можуть повернути виклики методів USBDevice мають унікальний код, а отже однозначно вказують на причину виникнення помилки.

Коди помилок записані у вигляді констант у спеціальному файлі заголовку (USBDeviceError.h), який можна підключити при використанні бібліотеки драйвера характерографа із програми на мові С або С++. Однак можливі варіанти використання бібліотек з іншими мовами програмування в які неможливо підключити згаданий файл заголовку. В цьому випадку доведеться працювати безпосередньо з числовими значеннями кодів. В таблиці наведено константи можливих помилок, їх числові значення та короткий опис.

Таблиця

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| Константа | Код | Опис |
| STATE\_OK | 0 | Виклик функції завершися успішно. |
| NO\_DLL | 1 | Помилка при завантаженні бібліотеки — файл бібліотеки не знайдено. |
| NO\_FUNCTION | 2 | Помилка при завантаженні бібліотеки — неможливо отримати адресу однієї або більше функцій, що необхідно завантажити. Тобто в завантаженому файлі немає функції з відповідним ім’ям. |
| NO\_DEVICE\_CONNECTED | 3 | Пристрій не знайдено. Необхідно пересвідчитись, що підключено до USB порту комп’ютера. |
| NOT\_FULL\_DATA | 4 | Помилка при отриманні даних з мікроконтролера — прийнято менше ніж очікувалося. |
| INVALID\_PIPE\_HANDLE | 5 | Не вдалось відкрити з’єднання. |
| CALL\_GET\_LAST\_ERROR | 6 | Виклик однієї з системних функцій Windows завершився з помилкою. Щоб отримати більше інформації необхідно викликати функцію GetLastError(). |
| SESSION\_ALREADY\_OPEN | 7 | Спроба відкрити другу сесію, коли перша ще не закрита. Виникає при використанні кількох потоків, або внаслідок неуважного використання методів при ручному відкритті сесій. |
| COMMUNICATION\_ERROR | 8 | Помилка передачі. Код відповіді від мікроконтролера не співпадає з очікуваним. |

Коди помилок від 0 до 1000 є зарезервованими використання при подальшій розробці даного класу. Похідні класи можуть додавати нові коди помилок починаючи зі значення , що не входять в визначений діапазон.

Для передачі даних використовується метод SendReceive, який посилає дані вказаної довжини та приймає дані у відповідь. Якщо дані не були відправлені або прийняті за час, що вказується при виклику, то метод завершиться з помилкою.

Передача даних реалізована у вигляді, так званих, сесій. Тобто фактичне з’єднання з пристроєм відкривається безпосередньо перед відправленням даних (за допомогою виклику методу SendReceive) та закривається одразу після отримання відповіді, або в разі збою при передачі. Це дозоляє зменшити затрати ресурсів.

Власне передача даних відбувається за допомогою іменованих каналів Windows (Named Pipes). Це засіб дозволяє організувати передачу даних між локальними процесами, а також між процесами, запущеними на різних робочих станціях в мережі.

Канали типу Pipe найбільше схожі на файли, тому вони досить прості у використанні.

Через канал можна передавати дані тільки між двома процесами. Один з процесів створює канал, інший відкриває його. Після цього обидва процеси можуть передавати дані через канал в одно або двосторонньому режимі, використовуючи для цього добре знайомі функції, призначені для роботи з файлами, такі як ReadFile і WriteFile. Слід зауважити, що додатки можуть виконувати синхронні або асинхронні операції з каналами Pipe, аналогічно тому, як це можна робити з файлами.[XXXXXX 1

<http://www.frolov-lib.ru/books/bsp/v27/ch2_3.htm>]

В класі USBDevice є ще один метод призначений для передачі даних — SendRequest. На відміну від попереднього він сам відкриває та закриває сесії. Цей метод отримує параметром вказівник на об’єкт класу RequestToDevice або похідного від нього.

Клас RequestToDevice є об’єктним представленням запиту. Він є абстрактним та розроблений для спрощення рутинних операцій, таких як створення та видалення буфера, слідкування кількістю даних у буферах та убезпеченням від переповнення. Похідні класи можуть реалізовувати більш складну логіку для наповнення буфера даними для відправки та обробки прийнятої відповіді. Таким чином реалізовано логічне розділення обов’язків при якому кожен клас похідний від RequestToDevice є конкретною дією, що може бути виконана пристроєм.

Асинхронні запити

Метод SendRequest має одну проблему, яка полягає в тому, що він синхронний. Це означає, що при виклику цього методу керування не буде повернуто доки не буде отримано повну відповідь від пристрою. При використанні простого програмного забезпечення, наприклад консольних програм, така поведінка є допустимою і навіть бажаною, оскільки в цьому випадку очікування найлегший спосіб відслідкувати момент завершення операції, щоб почати обробку результатів. Необхідно просто помістити алгоритм оброки після виклику методу. Однак і в цьому випадку, якщо операція виконується надто довго, є ризик то що користувач буде вважати, що програма «зависла».

У випадку ж графічних додатків, всі дії виконують послідовно у, так званому, основному циклі. В цьому цикли, що безперервно виконується, проводиться оновлення графіки (кожен разу вся графічна частини повністю перерисовується), перевірка надходження нових запитів від користувача та виконання дій у відповідь на останні (наприклад відправлення запиту до пристрою). Якщо ж хоч одна частина буде виконуватись надто довго, що це помітив користувач, а для цього досить навіть пів секунди, виникле дуже неприємний ефект короткочасного зависання.

Щоб подолати цей недолік було додано метод SendRequestAsync, який є аналогічним методу SendRequest, за винятком того, що він є асинхронним, тобто відправлення запиту та очікування відповіді виконується в іншому потоці (Thread).

Щоб пояснити цей термі необхідно розглянути модель процесів операційної системи. Процесом називається екземпляр завантаженої в пам'ять програми, що виконується в системі. Цей екземпляр може створювати потоки, які представляють собою послідовність машинних інструкцій для виконання. А процес є лише своєрідним контейнером для об’єднання потоків.

Будь-який процес має хоча б один поток (основний), що був створений разом з ним. Якщо в системі є достатня кількість процесорів то всі вони можуть виконуватись одночасно, однак це рідко будає так. Тому зазвичай потоки виконуються не одночасно, по черзі. Однак перемикання між ними відбувається настільки швидко, що створюється ілюзія паралельного виконання. Послідовність перемикання, як і час роботи потоку розраховується динамічно і жодним чином не гарантується.

В Windows реалізовано «витісняючу» багатозначність, тобто система може перервати будь-який поток та запустити інший. Саме це може створити найбільше проблем. Кожен процес має спільні ресурси до яких може отримати доступ кожен поток. Якщо поток, що використовує ресурс буде перервано і запущено інший, що потребує доступу до того самого ресурсу то результат роботи програми буде не визначений і залежатиме від послідовності включення потоків. Такий стан називається «станом гонки»( race condition).[ <http://www.codenet.ru/progr/cpp/process-threads-sync.php>]

Тому необхідним є механізм, що дозволить потокам координувати свою роботу — синхронізація потоків.

Найпростіший механізм синхронізації називається «критичними секціями». Він дозволяє виділити ділянки коду де необхідно отримати доступ до спільних ресурсів і гарантувати, що в кожен момент часу в кожній критичній секції буде не більше одного потоку.

Критична секція це об’єкт ядра операційної системи. Щоб її створити необхідно викликати функцію InitializeCriticalSection. Перед входом в ділянку коду, яку потрібно синхронізувати, необхідно викликати EnterCriticalSection, після виходу з неї LeaveCriticalSection.

В даному рішення використовується дві критичні секції. Одна синхронізує доступ до прапорця, що вказує чи була відкрита сесія, щоб унеможливити її повторне відкиття в іншому потоці. Цей прапорець встановлюється в методах OpenSession, CloseSession та SendReceive. Останній синхронізується щоб запобігти хаотичному запису з декількох потоків в буфер пристрою.

Інша синхронізація відбувається на рівні доступу до об’єкта поточного запиту. Якщо запиту не має то можна посилити новий, інакше спроба завершиться помилкою.

Власне створення потоку відбувається за допомогою системної функції CreateThread, інформація про яку може бути отримана із документації. Тут потрібно пам’ятати про те, що запускати в паралельному потоці можна лиши функцію, що не є членом класу. Для вирішення цієї проблеми можна скористатися «дружною» функцією, тобто функцією, що може отримати доступ до прихованих членів класу, проте сама не є його членом. При запуску потоку буде передано вказівник на об’єкт класу USBDevice для взаємодії з ним.

Для обробки повідомлень, що які виникають під час роботи програми, створено спеціальний клас Loger. Він бере на себе усю роботу з текстом для більшої зручності заміни способу виведення повідомлень. Об’єкт цього класу створює та видаляє основний клас і використовує його для конвертації кодів помилок в текст.

За завантаження бібліотеки універсального драйвера відповідає клас LibraryLoader. Він містить методи для завантаження, вивантаження та отримання шляху до цієї бібліотеки. Потреба у ньому з’явилась з огляду на те, що при розробці кожна частина програми знаходиться у власній папці проекту, а після завершення всі частини готового продукту будуть знаходитись в одній папці. Іншими словами цей клас знає де потрібно шукати необхідні бібліотеки. З цієї ж причини йому необхідний метод, що дозволяє дізнатись з якого місця було завантажено бібліотеку. Цей клас також використовується всередині об’єкту USBDevice.

Створення проекту.

Як було зазначено для створення цієї частини було використано середовище розробки Microsoft Visual Studio. При створенні та налаштуванні проекту можуть виникнути наступні труднощі.

Розташування файлів заголовків може не збігатись з задиним за замовчуванням. Щоб вказати ці шляхи необхідно у головному меню виконати: Проект – Властивості – Властивості конфігурації – С/С++ – Загальне – Додаткові каталоги включення. Щоб забезпечити легкий запуск проекту на різних комп’ютерах в цьому полі необхідно вказати саме відносний шлях до папки з файлами заголовків відносно кореневої папки проекту.

Далі необхідно встановити правильне кодування текстових даних. Для цього у головному меню виконати: Проект – Властивості – Властивості конфігурації – Загальне. У полі Набір знаків встановити значення «Використовувати багатобайтне кодування».

### Розробка модуля відображення

Окрім влясне відображення графіки ця частина системи відповідає за відображення інтерфейсу користувача, отримання запитів від нього та оброку результатів. Розробка всього цього «з нуля» потребує багато часу то зусиль, тому можна скористатись одним з готових рішень. Ідеальне рішення повинно мати засоби для роботи з тривимірною графікою, мати можливість взаємодіяти з машинними бібліотеками, використовувати просту але функціонально розвинену мову програмування, бажано об’єктно-орієнтовану та мати засоби для побудови інтерфейсу користувача.

Подібні вимого часто пред’являються інструментам призначеним для розробки тривимірних ігор. Найбільш популярним таким інструментом є Unity3D від компанії Unity Technologies. Він представляє собою бібліотеку, що має всі необхідні для роботи компоненти, та графічний редактор для спрощення позиціонування елементів тривимірної сцени.

В основному Unity3D призначений для розробки ігор, однак може бути використаний і в інших цілях. Додатки, що розроблені з його використанням можуть бути запущені на декількох операційних системах, в тому числі і мобільних. З огляду на те, що апаратна частина лише одне з можливих джерел даних, а всі необхідні, для взаємодії з нею, алгоритми знаходяться у низькорівнеій бібліотеці, що має досить вузький інтерфейс, можна легко створити мобільну версію графічного модуля програми.

Розробляти додатки на Unity3D можна використовуючи мови високого рівня C# або JavaScript (сильно відрізняється від версії для браузерів). Остання є не дуже зручною для створення великих проектів тому зазвичай використовують саме C#. Це об’єктно-орієнтована мова програмування. Такий підхід є більш гнучким оскільки він дозволяє розділити функціонал програми між окремими класами. Кожен клас містить дані і функції призначені для рішення однієї конкретної підзадачі. Наприклад якщо клас використовує бібліотеку то він сам її завантажує, використовує та вивантажує коли це йому необхідно, так щоб іншим класам, які використовують перший не було необхідності знати про це. Все що відомо про клас це його інтерфейс, тобто набір функцій, які можна викликати у об’єкта цього класу, щоб змусити його робити деякі дії.

Іще однією особливістю мови C# використання так званого керованого коду. Цей термін було введено корпорацію Microsoft по відношенню до їхньої системи .Net, він означає що після компіляції буде отримано не машинний код, а код для середовища виконання. Це програмний посередник між розроблюваною програмою та операційною системою, що в свою чергу дозоляє абстрагуватись від особливостей останньої і розробляти програми, що можуть бути запущені не різних операційних системах.

#### Взаємодія з бібліотекою драйверу пристрою

Реалізація взаємодії графічного модуля з приладом, перш за все потребує взаємодії з його драйвером, який, в свою чергу, організує реальний обмін даними з апаратною частиною. Драйвер, який описано раніше, розроблений у вигляді бібліотеки з використанням мови програмування C++ на основі некерованого коду. Це може викликати деякі труднощі при взаємодії з керованим кодом мови C#.

На щастя Unity3D має засоби, що дозводять взаємодіяти з такою бібліотекою, через механізм так званих «Native plugins». Для цього необхідно додати файл бібліотеки (.dll) в проект, як звичайний файл ресурсів, але в особливу папку Plugins в корені проекту, оскільки там відбувається пошук всіх файлів бібліотек.

Щоб прив’язати метод який може бути викликаний з керованого коду до функції з бібліотеки обхідно об’явити його як зовнішній статичний (static extern), тобто для виклику з бібліотеки функції void Test(), необхідно записати так: «*public static extern void Test();*». А щоб вказати з якої саме бібліотеки буде викликана функція потрібно використати спеціальний атрибут DllImport зі строковим параметром — ім’ям бібліотеки. [<http://www.alanzucconi.com/2015/10/11/how-to-write-native-plugins-for-unity/>]

Цей спосіб використання бібліотеки дуже легкий і, як стверджують розробники, він працює на всіх платформах, що підтримуються. Щоб її підключити та використовувати функції необхідно всього дві стрічки коду на кожну, а додати до проекту можна простим перетягуванням в папку. Всю іншу роботу система зробить сама. Однак він має один досить суттєвий недолік, який полягає в тому що завантажена одного разу бібліотека вже не буде вивантажена аж до перезавантаження редактора Unity. Тобто вона буде зайнята, а файл захищено від модифікації. Іншими словами, щоб перебудувати бібліотеку необхідно перезапустити редактор.

Зважаючи на те, що перезавантаження редактора займає кілька хвилин, використання цього способу при розробці, коли перебудовувати бібліотеку доводиться постійно, є практично неможливим, навіть з усіма його перевагами.

Альтернативою є динамічне завантаження бібліотеки засобами операційної системи Windows, за допомогою системних функцій LoadLibrary, GetProcAddress та FreeLibrary, які були детально описані у попередньому підрозділі разом із алгоритмом завантаження.

Ці функції завантажуються за допомогою першого способу зі системної бібліотеки «kernel32.dll». Зважаючи на те, що kernel32.dll є частиною ядра операційної системи вона не буде перебудована, тому немає необхідності її вивантажувати, а значить використання першого способу є цілком виправданим.[<https://blogs.msdn.microsoft.com/jonathanswift/2006/10/03/dynamically-calling-an-unmanaged-dll-from-net-c/>]

Завантаження бібліотеки відбувається так само як і в мові C++, за винятком того, що замість вказівників на об’єкти використовується спеціальний тип IntPtr, який по суті є вказівником на область некерованої пам’яті.

Враховуючи це сигнатури функцій, як і перелік кроків, що необхідно виконати буде трохи змінений. Функція LoadLibrary приймає ім’я бібліотеки яку буде завантажено та повертає вказівник у форматі IntPtr. При відсутності вказаного файлу раніше функція порожня значення (NULL), однак згідно з правилами мови програмування змінній типу IntPtr не може присвоєне це значення. Тому для перевірки успішності операції необхідно порівнювати результат зі спеціальним значенням IntPtr.Zero, яке є еквівалентом порожнього вказівника.[<https://msdn.microsoft.com/ru-ru/library/system.intptr.zero(v=vs.110).aspx>]

Функція GetProcAddress, що використовується для пошуку адреси функції отримує на вхід вказівник на завантажену бібліотеку (IntPtr) та строковий параметр з ім’ям функції, для завантаження. Однак в мові C# не можна викликати функцію через IntPtr вказівник. Для цього передбачений спеціальний тип делегат (Delegate) який може містити адресу методів та дозволяє їх викликати. Щоб конвертувати IntPtr вказівник в делегат слід використати метод Marshal.GetDelegateForFunctionPointer, який приймає вказівник та тип (об’єкт класу Type) делегату та повертає його, щойно створений об’єкт.

Функція вивантаження (FreeLibrary) змінила лише тип параметра-вказівника, а в іншому залишилась без змін.[<http://answers.unity3d.com/questions/10216/unload-a-plugin.html>] [<http://answers.unity3d.com/questions/293867/easier-way-to-handle-unloading-dlls.html>]

Залишилось згадати лише про одну особливість такого використання бібліотеки, яка полягає в тому, що абсолютний шлях до неї не повинен містити кириличних символів. В іншому випадку можуть виникнути проблеми з кодуванням і завантаження може не відбутись.

#### Обмін даними між драйвером та модулем відображення

При вимірюванні характеристик виникає необхідність передачі значних об’ємів даних. Механізм передачі потребує окремого розгляду оскільки така передача може зайняти багато часу, що неодмінно позначиться на швидкості відгуку всієї програми. Річ у тім, що графічна частина системи працює в одному потоці, тобто всі дії виконуються по черзі в так званому головному циклі, а якщо якась операція триватиме значний час (навіть секундна затримка буде досить помітною) то програма весь цей час не реагуватиме на дії користувача, більше того буде схоже, що вона «зависла».

Не зважаючи на те, що найбільші затрати часу спричиняє саме передача даних між апаратною частиною та комп’ютером, даний підрозділ присвячений обміну даними між керованим кодом скриптів Unity на мові C# і некерованим кодом бібліотеки, що написана з використанням мови C++.

Як уже сказано найпростіший варіант — виклик функції з бібліотеки, що очікує отримання даний від пристрою та повертає весь масив. У випадку якщо всі дані ще не прийнято функція може повернути порожнє значення (NULL). Він має багато недоліків, яких можна віднести утруднення контролю пам’яті на гранці між керованим та некерованим кодом, особливо якщо взяти до уваги те, що у некерованому коді функція може повернути масив лише у вигляді вказівника на його перший елемент, а в керованому коді робота з вказівниками має деякі складнощі. Другий недолік — складність встановлення розмірів отриманих даних.

Щоб пришвидшити відгук програми при передачі інформації можна розбити масив даних на менші частини. Однак і це не вирішує граничних проблем з виділенням та звільненням некерованої пам’яті та потребує окремої передачі розміру переданої частини масиву.

З огляду на недоліки було прийнято рішення відмовитись від прямого повернення масивів даних з некерованого коду.

Щоб уникнути очікування прийняття всіх даних можна використати механізм обробки подій, що заснований на застосуванні функцій зворотного виклику — тепер функція керованого коду буде викликана з некерованого.

При відправленні запиту на отримання масиву даних до некерованого коду драйверу передається вказівник на функцію, що буде викликана після завершення отримання даних від апаратної частини. Іншими словами відбудеться подія звершення прийняття і всі модулі що «підписані» на неї отримають (в даному випадку це лише графічний модуль) повідомлення і зможуть обробити цю подію. Проте, прийняття даних відбувається в додатковому потоці, і очевидно, функція-обробник буде викликана в тому ж таки додатковому потоці. Тобто окрім синхронізації потоків на рівні драйвера необхідна додаткова синхронізація на рівні керованого коду.[<http://www.realcoding.net/articles/glava-17-vzaimodeistvie-s-neupravlyaemym-kodom.html>]

Найбільш оптимальне рішення полягає спільному використанні пам’яті до якої мають доступ обидва модулі програми. Некерований модуль не може отримати доступ до керованої пам’яті. А в мові C# є всі необхідні засоби для роботи з некерованою пам’яттю яку використовує C++.

Спільно використовувати можна будь-яку структуру даних, що може включати в себе масив з даними, його розміри та, за необхідності, іншу інформацію.

Для реалізації такого обміну необхідно створити однакові структури на C++ та C#. У випадку останньої використовуються спеціальні атрибути, що допоможуть правильно розташувати поля керованої структури. В некерованій бібліотеці створити функцію що отримує вказівник на цю структуру(SetBuffer), зберігає його та записує туди дані по мірі їх отримання від приладу та функцію, що показує чи завершена передача даних (IsReseived), вона поверне логічне значення FALSE доки не буде отримано всі дані, а потім поверне TRUE.

Для початку процедури отримання даних потрібно виконати наступні кроки. Спершу потрібно створити об’єкт керованої структури. Потім виділити некеровану пам’ять під структуру та скопіювати туди щойно створений об’єкт цієї структури. Після копіювання буде отриманий вказівник на цю область пам’яті, який треба передати до бібліотеки викликом відповідної функції, що також означатиме початок очікування передачі.

Далі на кожній ітерації основного циклу необхідно перевіряти чи вже отримано всі дані. Після того як це станеться можна отримати новий об’єкт керованої структури з цієї області некерованої пам’яті та вивільнити її.

Основною перевагою цього варіанту передачі є те, що необхідна синхронізація потоків лише на ріні драйверу. Іншою превагою є необхідність лише двох функцій для організації такої передачі та прозора робота з пам’яттю.[<https://habrahabr.ru/post/84076/>]

#### Взаємодія з драйвером приладу

За взаємодію з драйвером відповідає клас USBDevice. Він є об’єктним відображенням підключеного пристрою з яким можна обмінюватись інформацією, тобто до якого можна підключитись, послати запит та отримати відповідь.

Даний клас є абстрактним тобто не представляє конкретного пристрою і має лише функціонал доступний для будь-якого USB пристрою, що може бути розроблений за подібною схемою. Додавати реалізацію функціоналу для конкретного пристрою можна за допомогою механізму наслідування. Додавати реалізацію функціоналу означає додати можливість відправляти конкретні повідомлення, що можуть бути оброблені на стороні мікроконтролера.

Ініціалізація пристрою проходить в два етапи. На першому відбувається динамічне завантаження бібліотеки драйвера та проводиться пошук в ній необхідних для роботи функцій, за допомогою функцій kernel32.dll. На другому проводиться пошук підключених до USB-порту пристроїв. В разі якщо файл бібліотеки, одну або більше функцій з неї не знайдено або немає підключених пристроїв буде отримано повідомлення про помилку та буде завершено процес вимірювань, а всі спроби послати повідомлення будуть завершуватись з помилкою. Слід зауважити, що це не вплине на роботу системи відображення, оскільки прилад є лише одним з можливих джерел даних.

Керований клас USBDevice не генерує помилок, а лише відображує ті, що отримані від драйвера, тому отримання інформації про помилку можна звернутись до таблиці.

Конкретний клас TracerDevice є об’єктно-орієнтованим представленням приладу характерографа та має набір методові для взаємодії з конкретним типом пристрою. Більше того він може працювати лише з пристроєм прошивка якого має відповідну йому версію.

#### Вибір способу побудови поверхні

Графік функції двох змінних відображається у вигляді поверхні. Вихідні дані для побудови такої поверхні зручно зберігати у вигляді так званої карти висот (Heightmap). Вона представляє собою двовимірну матрицю, довільної розмірності. Кожен її елемент є значенням висоти поверхні в даній точці. Тобто вона є представленням масиву тривимірних векторів, в яких координати x та y пропорційні індексам елемента i та j по горизонталі та вертикалі відповідно, а координата z дорівнює значенню цього елементу — висоті. Між кожними чотирма сусідніми точками, що утворюють квадрат будуються по два трикутники, з яких і буде складена вся поверхня.

В термінах комп’ютерної графіки ці трикутники називаються полігонами (Polygon), на основі яких будуються всі тривимірні фігури. Зазвичай полігони мають трикутну форму, оскільки три це найменша кількість точок необхідна для побудови площини. Крім того з курсу елементарної математики відомо, що площину не можна провести більше ніж через три довільні точки.

Як і більшість сучасних засобів відображення тривимірної графіки, Unity зазвичай використовує готові тривимірні моделі, які попередньо завантажені з файлу.

З огляду на це для побудови поверхні можна було б використати заздалегідь заготовлені полігони у вигляді окремих моделей. Проте, перепад висоти між сусідніми точками може сильно відрізнятись, а отже різними будуть розміри та форма трикутників.

Впоратись з цією ситуацією можна двома шляхами. Або підготувати багато полігонів для всіх можливих випадків, що неодмінно призведе до невиправданих витрат пам’яті. Або написати досить складний алгоритм масштабування кожного полігону в залежності від необхідних розмірів, що неодмінно призведе до появи помилок. З цього можна зробити висновок, що дане рішення не є оптимальним.

Знаючи, що карти висот часто використовуються для моделювання ландшафтів місцевості, розробники включили в стандартну поставки спеціальний інструмент Terrain, що дозволяє динамічно створювати ландшафти прямо редакторі, або навіть під час роботи програми. Він містить досить розвинений функціонал наприклад для пошуку точок перетину інших об’єктів з поверхнею ландшафту, або динамічного нанесення текстур. Це все може призвести до збільшення затрат ресурсів.

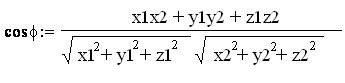
З огляду на все це найбільш оптимальним способом для відображення поверхні є використання низькоірвневих засобів побудови графічних примітивів, що майже напряму використовують засоби графічних адаптерів.

#### Побудови тривимірного примітиву

Звичайний опис тривимірних моделей складається зі структури даних до якої входять наступні масиви даних.

**Масив вершин** містить координати точок з координатами (x, y, z), які є вершинами полігонів-трикутників.

**Масив нормалей**. Нормалі зазвичай використовуються для розрахунку освітленості поверхні — чим більший кут між вектором нормалі та вектором освітлення тим більш яскраво буде освітлений полігон. Якщо є вектори з координатами (x1, y1, z1) та (x2, y2, z2), то кут між ними може бути знайдений за наступною формулою:



Скалярний добуток цих векторів розділений на добуток їх довжин. Для спрощення розрахунків у процесі побудови зображення на екрані, нормалі зазвичай мають одиничну довжину. Очевидно, що нижню частину можна відкинути та отримати досить просту формулу:

E:\ForLoad\Win7Load\prot\f2.jpg

Нормалі завжди рахуються до побудови зображення, щоб зекономити ресурси комп’ютера.[<http://www.alexeyspace.ru/articles/3/>]



Рисунок текстура

**Масив координат текстури**, або так званий uv-масив. Він містить відносні (x, y) координати текстури, що можуть приймати значення від 0 до 1. Вектор (0, 0) відповідає лівому нижньому куту зображення текстури, а (1, 1) верхньому правому. На рисунку зображено три точки з відповідними координатами (x1, y1), (x2, y2), (x3, y3). Заштрихована трикутна область буде «натягнена» на полігон у вершинах якового вказані відповідні uv-координати.

**Масив кольорів**. Для кожної вершини задає колір зазвичай в 24х бітному форматі, хоча формат кольору може змінюватись залежно від системи. Колір вказується для кожної вершини окремо, та буде поступово змінюватись при переході між точками з різними кольорами.

**Масив індексів**. На відміну від усіх вищезгаданих масивів, де кожний елемент відповідає одній точці, даний масив має три елементи для кожного трикутника. Наприклад для побудови квадрату (рис) необхідно 2 трикутники, тобто шість вершин. Однак при цьому можна отримати надлишкові дані, пов’язані з тим, що дві вершини мають однакові координати (B1 = B2, D1 = D2). Інший спосіб передбачає використання 4 вершин, однак з’являється необхідність використання деяких засобів, що дозволять однозначно встановити до яких трикутників належить вершина.



Рисунок квадрат

Кожен елемент масиву індексів це номер вершини в масиві вершин (цифри у кружечках). За кожними трьома елементами в масиві індексів буде побудований один трикутник (індекси 1, 2, 3 для першого і 1, 3, 4 для другого трикутника). Тут існує одна особливість: всі трикутники необхідно описувати за годинниковою стрілкою, якщо дивитись з камери (рис квадрат). Справа в тому, що це дозволяє відображати лише ті полігони, що «дивляться» у камеру. Трикутники описані за стрілками будуть видимі у такому положенні, а якщо описати їх в зворотному порядку то вони будуть видмі лише з іншого боку.

Інша особливість використання індексів полягає в тому, що нормалі вказуються для кожної точки і при використанні однієї точки в декількох полігонах вони обидва матимуть лише одну нормаль. У випадку з квадратом цього не помітно, однак якщо між площинами нормалей є значний кут може виникнути несподіваний ефект освітлення(Рисунок)



Рисунок

На першому рисунку зображено октаедр зі спільними вершинами, на другому для кожного трикутника вказано власні координати вершин, тобто деякі дублюються. У другому випадку нормалі кожного полігону перпендикулярні площині цього полігону, тому добре видно чіткі грані. У першому — вказано одну нормаль і рейдеру доводиться інтерполювати нормалі для кожної точки. Це призводить то ефекту візуального згладжування різких переходів і зазвичай використовується для сфер або поверхонь з плавним переходом.[<https://habrahabr.ru/post/194620/>]

#### Алгоритм побудови поверхні

Для побудови та відображення поверхні створено два класи Surface та Plotter.

Перший призначено для зберігання та видачі в потрібній формі інформації про поверхню. Його основою є двовимірний масив, в якому зберігаються дані, для побудови карти висот, розміри масиву, масштаб та посилання на об’єкт Mesh, що може бути побудований на основі цієї поверхні. Також клас містить набір методів, які спрощують додавання, редагування даних та звернення до елементів за допомогою одного або двох індексів. Тобто в залежності від ситуації поверхня може бути представлена як одновимірний або двовимірний масив. Це необхідно для спрощення генерації окремих масивів тривимірної моделі.

Другий клас Plotter виконує власне побудову моделі на онові об’єкту поверхні. Основний його метод Generate, отримує в якості параметру Surface, та повертає тривимірне зображення — Mesh. Цей метод є основним тому його алгоритм слід розглянути детальніше.

Преш за все необхідно визначити розміри кожного масиву (vertices, normals, colors, triangles) та виділити для них пам’ять. Нормалі та кольори встановлюються для кожної вершини, а значить розміри кожного масиву дорівнюють кількості елементів у вихідній матриці.

На другому етапі відбувається заповнення масивів вершин, кольорів та нормалей. В цьому випадку зручно представити поверхню як одновимірний масив та послідовно обробляти дані кожної вершини: створювати вектор, розраховувати нормаль та колір. Для більшої наочності відображення висота кожної точки підкреслюється її кольором — чим вище точка тим яскравіший колір. Значення кольору нормується за максимальною висотою точки на поверхні.

  
Рисунок

Заключним етапом є заповнення масиву індексів, кількість елементів якого розраховується за наступною формулою:

(N – 1) \* (M – 1) \* 12

де N та M ширина і висота масиву відповідно(рис). Для кожної точки з індексами (i, j) будуються два трикутники для кожного квадрату, що утворений точками (i, j), (i+1, j), (i+1, j+1), (i, j+1). Щоб поверхню було видно згори та знизу необхідно побудувати два такі квадрати. Два трикутники згори, два знизу, по три точки на кожний, всього 12 значень для кожної точки.

На відміну від вихідного масиву індекси розташовуються послідовно, в одновимірному масиву, тому для кожної точки потрібно розрахувати її порядковий номер:

n = j \* M + i

Індекс наступної точки ліворуч буде n+1, а наступної точки вгору буде зміщений на розмір рядка, тобто n+N+1. З цього неважко зробити висновок в якій послідовності слід записувати точки. В кінці функції готова модель буде повернута в точку виклику і її можна помістити в спеціальний компонент для прорисовування.

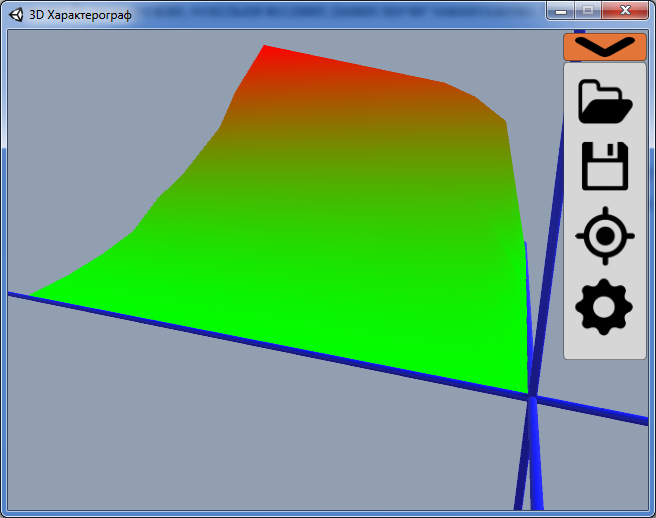
Для більшої наочності та полегшення сприйняття тривимірна поверхня буде підсвічена різними кольорами в залежності від висоти. В даному випадку використано перехід кольору, який нормується по найбільшому перепаду висоти поверхні, від зеленого, в найнижчій точці поверхні, до червоного — в найвищій. Для реалізації цього потрібно щоб формат структури даних вершин підтримував роботу з кольором. Зазвичай цього не потрібно, оскільки дуже часто щоб модель мала не лише колір а й рисунок — текстуру. За оброку вершин відповідають шейдери — програми, що виконуються безпосередньо відеоадаптерами. Тому для відображення кольорів було використано специфічний, хоч і дуже простий шейдер [<http://answers.unity3d.com/questions/391561/create-a-mesh-and-color-cubes.html> ]

Об’єктна структура програми

Інтерфейс користувача та використання програми

Для роботи з системою необхідно підключити прилад до USB порту комп’ютера та пустити програму для відображення графіки. Програма сама виконає завантаження драйвера та ініціалізацію приладу.

Після завантаження буде відображено головне вікно програми. Спершу воно буде порожне, оскільки жодних даних ще не завантажено. На рисунку 1, показано вигляд вікна програми із уже завантаженими тестовими даними. Для тесту було взято характеристики транзистора ГТ309.

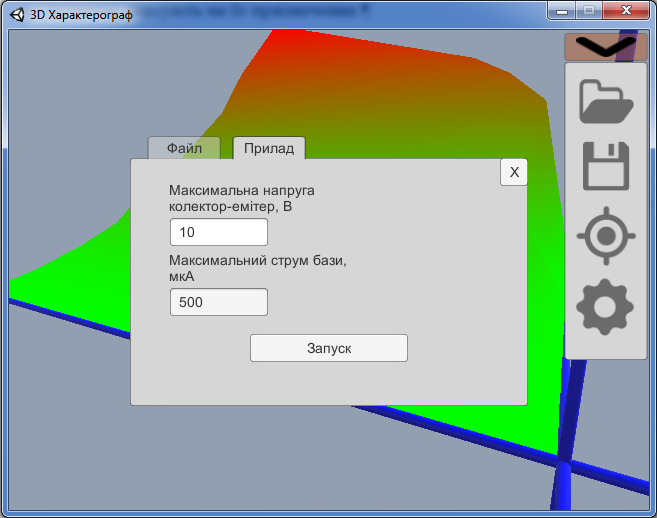


Це так званий режим огляду. Це основний режим який призначено для відображення готових характеристик. В цьому режимі можна повертати характеристику за допомогою правої клавіші миші та масштабувати її відносно камери за допомогою колеса миші.

У верхньому правому кутку вікна знаходиться кнопка для відкриття та закриття головного меню. Це меню реалізовано у вигляді випадаючого списку, що меню знаходиться в правій частині вікна (рис 1) та має наступні пункти:

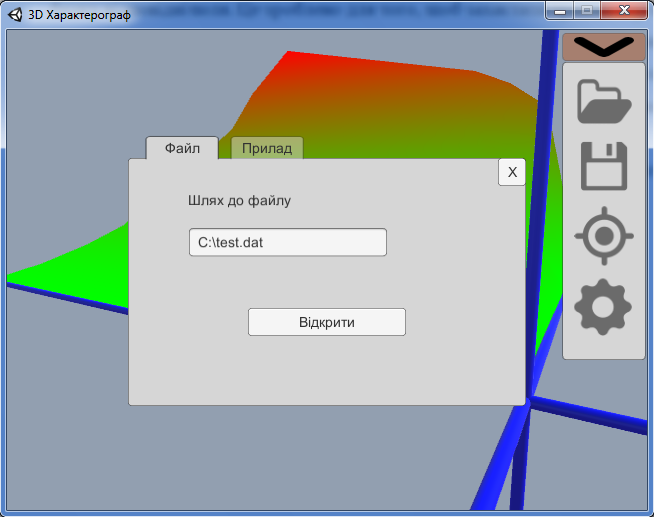
* Відкрити. Дозволяє виконати завантаження даних у програму;
* Зберегти. Призначено для збереження даних у файл;
* Маркер. Вмикає або вимикає режим маркера;
* Налаштування. Відкриває вікно з налаштуваннями програми.

Пункти не мають підписів, однк вони позначені іконками, що однозначно вказують на їх призначення. При відкритті кожного меню всі функції та кнопки попереднього меню будуть заблоковані, і відображені менш яскравим кольором.



Щоб розпочати роботу з програмою потрібно вибрати в головному меню пункт «Відкрити», після чого з’явиться діалгове меню що показане на рисунку 2.

Це меню має дві вкладки «Файл» та «Прилад», для отримання даних відповідно з файлу або з приладу. Слід зауважити, що архітектура програми розроблена таким чином, що апаратна частина є лише одним з можливих джерел даних. Це зроблено для того, щоб можна було додавати нові джерела даних, та способи збереження. Наприклад планувалось додати можливість зберігати дані на сервер та завантажувати їх з нього. Це дозволило б використовувати підсистему відображення на інших операційних системах, наприклад на мобільних. Засоби використані для її розробки це зробити, однак підключення апаратної частини може викликати значні труднощі.



Щоб виміряти характеристику потрібно перейти на вкладку «Прилад» та вказати максимальні безпечні значення напруги колектор-емітер та струму бази у відповідні поля. Це зроблено для того, щоб захистити транзистор від надмірного навантаження під час вимірювань. Після введення відповідних даних кнопка «Запуск» стане доступною. Щоб розпочати власне процес вимірювання необхідно натиснути цю кнопку, після чого вона зникне і з’явиться шкали з прогресом процесу вимірювання у відсотках.

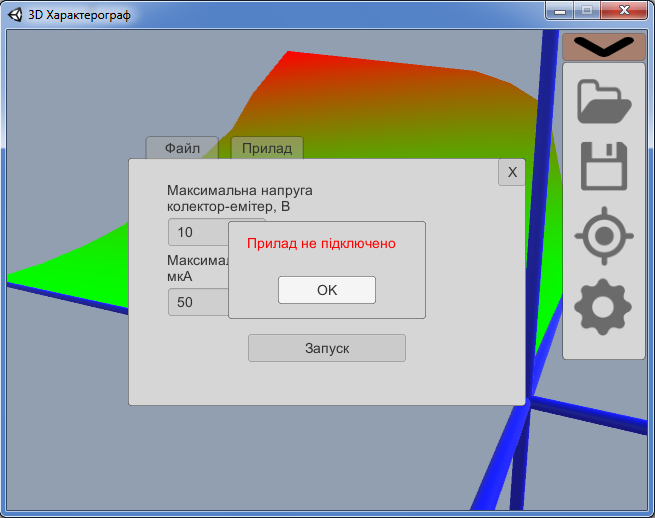
Коли значення шкали дійде до 100% меню завантаження буде закрито та повернуто в режим огляду.

Другий спосіб отримання даних в програму це завантаження їх з файлу (рис 3). Для цього потрібно відкрити меню завантаження та перейти на вкладку «Файл» та у відповідному полі вказати повне ім’я файлу, що обов’язково має включати його адресу, який необхідно відкрити, та натиснути копку «Відкрити». Далі файл буде і автоматично побудована характеристика, після чого меню буде закрито та повернуто в режим огляду.

Якщо такого файлу не існує буде виведено повідомлення «Такого файлу не існує», після чого можна змінити ім’я файлу та спробувати знову.

Наступний пункт меню «Зберегти» веде до відповідного меню збереження. Воно має лише одну вкладку «Файл», оскільки прилад не призначено для збереження даних. Вигляд цього вікна аналогічний вигляду вікна завантаження з файлу (рис 3), крім того, що в цьому випадку буде відображено кнопку «Зберегти».

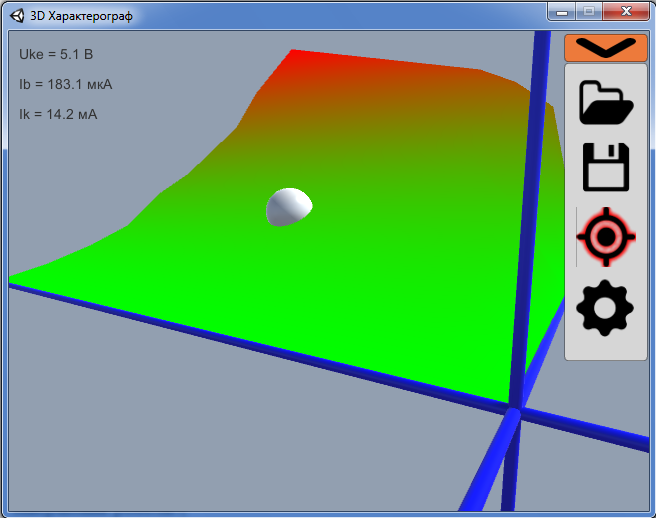
Для збереження необхідно вказати повне ім’я файлу, що включає його адресу на диску, та натиснути цю кнопку. Відповідний файл буде перезаписаний, і відновити його попередній зміст буде неможливо. Якщо такого файлу не існує то перед записуванням він буде створений.



Якщо при запуску вимірювання сталась помилка то буде показано повідомлення з відповідним текстом. На відміну від бібліотеки драйвера, яка у разі помилки повертає числовий код, відмінний від нуля, дана програма розшифровує цей код та виводить текс помилки. Окрім розшифрування стандартних помилок драйвера можуть виникнути і інші. Наприклад може не бути знайдено файл бібліотеки цього драйвера в результаті чого буде отримано помилку «Файл бібліотеки CurveTracer3DDriver.dll не знайдено». Це дуже гнучкий спосіб відображення повідомлень, оскільки він може бути викликаний з будь-якого місця програми.

Третій пункт головного меню вмикає або вимикає режим маркера (рис 4). Цей режим дозволяє відслідковувати значення параметрів (струм бази, напругу колектор-емітер та струм колектора) у заданій точці. Для встановлення маркера в потрібну точку клацнути лівою кнопкою миші по поверхні характеристики. Вибрана точка відображається за допомогою спеціальної позначки — білої кульки. Числові значення параметрів точки будуть відображені у верхньому правому кутку вікна. Їх наявність також можна сприймати, як індикацію стану даного режиму.

При ввімкненні режиму маркера іконка в головному меню буде підсвічуватись червоним.



Останній пункт меню — налаштування. При виборі даного пункту буде відкрито меню, що містить різні налаштування програми для відображення графіки. Наприклад там є пункти, що дозволяють ввімкнути або вимкнути відображення осей, підписів та іншого. Даний пункт не відповідає за налаштування програмної частини системи.

Після завершення роботи програма сама виконає всі необхідні дії, зокрема очищення ресурсів, відключення приладу та вивантаження бібліотек. Важливо лише слідкувати за тим, щоб кожного разу відбувалось коректне завершення роботи.

Тестовий проект

SendReceive синхронна

Module

<https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%9C%D0%BE%D0%B4%D1%83%D0%BB%D1%8C%D0%BD%D0%BE%D0%B5_%D0%BF%D1%80%D0%BE%D0%B3%D1%80%D0%B0%D0%BC%D0%BC%D0%B8%D1%80%D0%BE%D0%B2%D0%B0%D0%BD%D0%B8%D0%B5>

DLL

<http://www.xserver.ru/computer/sredaprogr/msvc/2/>

1

<http://www.frolov-lib.ru/books/bsp/v27/ch2_3.htm>

DLLMAIN

<https://msdn.microsoft.com/ru-ru/library/windows/desktop/ms682583(v=vs.85).aspx>