

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ УКРАИНЫ
Национальный университет кораблестроения
имени адмирала Макарова

Г. В. ПАВЛОВ, О. М. БЕЛАЙ, А. В. КОЗЛОВ

ЭЛЕКТРОНИКА И МИКРОСХЕМОТЕХНИКА

Методические указания к лабораторным работам

В двух частях

Часть первая

Рекомендовано Методическим советом НУК

Электронное издание комбинированного
использования на DVD-ROM



НИКОЛАЕВ ♦ НУК ♦ 2015

УДК 621.382(076)
ББК 32.85я73
П 18

Автори:

Г. В. Павлов, д-р техн. наук, профессор;

О. М. Білай, старш. викладач;

О. В. Козлов, канд. техн. наук, старш. викладач

Рецензент О. В. Блінцов, канд. техн. наук, доцент

Павлов Г. В.

П12 Електроніка і мікросхемотехніка : методичні вказівки до лабораторних робіт : у 2 ч. Ч. 1 / Г. В. Павлов, О. М. Білай, О. В. Козлов. – Миколаїв : НУК, 2015. – 62 с.

Викладено теоретичні основи, а також методику одержання експериментальних даних з теми "Р-N перехід. Дослідження напівпровідникового діода", "Дослідження стабілітрона. Параметричний стабілізатор", "Випрямлячі. Згладжуючі фільтри", "Біполярний транзистор. Статичні характеристики транзистора", "Компенсаційний стабілізатор напруги", "Біполярний транзистор у ключовому режимі роботи", "Польовий транзистор у ключовому режимі роботи".

Призначено для студентів, які навчаються за напрямком підготовки 6.050201 "Системна інженерія" спеціальності "Комп'ютеризовані системи управління і автоматика".

УДК 621.382(076)

ББК 32.85я73

Навчальне видання

ПАВЛОВ Геннадій Вікторович

БІЛАЙ Олег Михайлович

КОЗЛОВ Олексій Валерійович

ЕЛЕКТРОНИКА І МИКРОСХЕМОТЕХНІКА **Методичні вказівки до лабораторних робіт**

У двох частинах

Частина перша

(російською мовою)

Комп'ютерне верстання *А. Й. Лихіна*
Коректор *М. О. Паненко*

©Павлов Г. В., Білай О. М., Козлов О. В., 2015

© Національний університет кораблебудування
імені адмірала Макарова, 2015

Формат 60×84/16. Ум. друк. арк. 3,6. Об'єм даних 13477 кб. Тираж 15 прим. Вид. № 22. Зам. № 120.

Видавець і виготовник Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова
просп. Героїв Сталінграда, 9, м. Миколаїв, 54025, e-mail : publishing@nuos.edu.ua

Свідectво про внесення суб'єкта видавничої справи до Державного реєстру видавців,
виготовників і розповсюджувачів видавничої продукції

ДК № 2506 від 25.05.2006 р.

Лабораторная работа №1

P-N ПЕРЕХОД. ИССЛЕДОВАНИЕ ПОЛУПРОВОДНИКОВОГО ДИОДА

Цель работы: изучить структуру и принцип действия полупроводникового диода. На базе лабораторного комплекса LC_2012S практически исследовать полупроводниковый диод и снять вольт-амперные характеристики.

Теоретические сведения

Полупроводниковый диод. Схематично диод можно представить как две пластинки полупроводника, одна из которых обладает электропроводностью типа P, а другая – типа N. На рис. 1.1 дырки, преобладающие в пластинке типа P, условно изображены как носители положительного заряда, а электроны, преобладающие в пластинке типа N, – носителями отрицательного заряда.

Эти две области – два электрода: анод и катод. Анодом, т.е. положительным электродом, является область типа P, а катодом (отрицательным электродом) – область типа N. На внешние поверхности пластин нанесены контактные металлические слои, к которым припаяны проволоочные выводы электродов диода. Такой полупроводниковый прибор может находиться в одном из двух состояний: открытом, когда он хорошо проводит ток, и закрытом, когда он плохо проводит ток.

Если к его электродам подключить источник постоянного тока так, чтобы его положительный полюс был соединен с анодом диода, а отрицательный – с катодом (рис. 1.2,*а*), то диод окажется в открытом состоянии, и в образовавшейся цепи потечет ток, значение которого зависит от приложенного к нему напряжения и свойств диода. При такой полярности подключения батареи, электроны в области типа N перемещаются от минуса к плюсу, т. е. в сторону области типа P, а дырки в области типа P движутся навстречу электронам – от плюса к минусу.

Встречаясь на границе областей, называемой электронно-дырочным переходом или P-N переходом, электроны занимают "дырки". В результате и те, и другие при встрече прекращают свое существование.

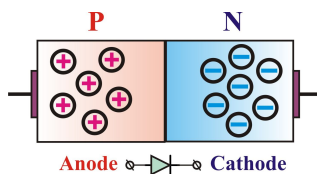


Рис. 1.1. Структура P-N перехода и схематическое изображение полупроводникового диода

Металлический контакт, соединенный с отрицательным полюсом элемента, может отдать области типа N практически неограниченное количество электронов, пополняя недостаток электронов в этой области, а контакт, соединенный с положительным полюсом элемента, может принять из области типа P такое же количество электронов, что равнозначно введению в него соответствующего количества дырок. В этом случае сопротивление P-N перехода мало, вследствие чего через диод течет ток, называемый прямым током. Чем больше площадь P-N перехода и напряжение источника питания, тем большей величины достигает прямой ток.

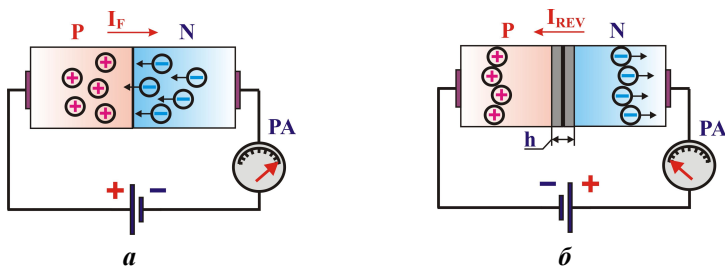


Рис. 1.2. P-N переход:
а – в прямом включении; **б** – в обратном включении

В справочной литературе по электронным компонентам данный параметр является одним из наиболее важных и определяется как *Forward current* I_F – максимальный прямой ток диода, а также *Peak forward surge current* I_{FSM} – пиковый максимальный прямой ток диода, действие которого допустимо в течении определённого временного интервала.

Например, для серии выпрямительных диодов GS1x, вышеуказанные параметры имеют следующие значения: $I_F = 1$ А (при $T = 75^\circ\text{C}$), $I_{FSM} = 30$ А (в течении времени $t = 8,3$ мс).

Если полюсы элемента поменять местами (рис. 1.2,**б**), диод окажется в закрытом состоянии. В этом случае электрические заряды на диоде поведут себя иначе. Теперь, удаляясь от P-N перехода, электроны в области типа N будут перемещаться к положительному контакту диода, а дырки в области типа P – к отрицательному. В результате, граница областей с различными типами электропроводности (потенциальный барьер h) расширится, образуя зону, обеднённую электронами и дырками с очень большим сопротивлением. Однако в этой зоне небольшой обмен носителями тока между областями диода будет происходить.

Поэтому через диод пойдет ток, но во много раз меньший, чем прямой. Этот ток называют обратным током диода I_R (*reverse current*).

Например, для серии выпрямительных диодов GS1x, $I_R = 10$ мкА (при $T = 25^\circ\text{C}$) и $I_R = 50$ мкА (при $T = 125^\circ\text{C}$). Как видно из справочных данных, обратный ток может возрасти в несколько раз при значительном увеличении температуры корпуса диода.

Если диод включить в цепь с переменным током (рис. 1.3), он будет открываться при положительных полупериодах на аноде, свободно пропуская ток одного направления (прямой ток), и закрываться при отрицательных полупериодах на аноде, почти не пропуская ток противоположного направления (обратный ток). Эти свойства диодов используются в выпрямителях для преобразования переменного тока в постоянный.

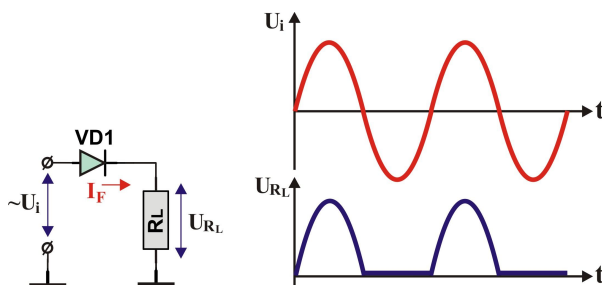


Рис. 1.3. Работа диода в цепи с переменным током

Напряжение, при котором диод открывается называют прямым (U_F – Forward Voltage) или пропускным.

Существует ещё один электрический параметр диода – это максимально допустимое обратное напряжение, прикладываемое к диоду в обратном включении (когда он закрыт), U_{RWM} – Working Peak Reverse Voltage.

Для выпрямительного диода 1N4004, $U_F = 1$ В, $U_{RWM} = 400$ В.

При прямом напряжении сопротивление диода не превышает нескольких десятков Ом. При обратном напряжении его сопротивление достигает сотен кОм и даже МОм.

Зависимость тока, протекающего через диод, от значения и полярности приложенного к нему напряжения называется вольт-амперной характеристикой диода (ВАХ). На вольт-амперной характеристике (рис. 1.4) различают прямую ветвь (I – область), соответствующую прямому току через диод,

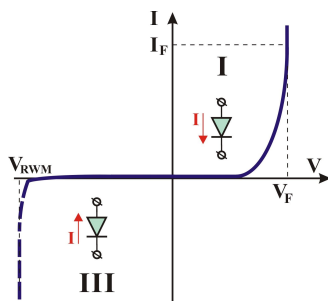


Рис. 1.4. ВАХ полупроводникового диода

и обратную ветвь (III – область), соответствующую обратному току. Прямая ветвь идет круто вверх, характеризуя быстрый рост прямого тока через диод с увеличением прямого напряжения. Обратная ветвь идет почти параллельно горизонтальной оси, при медленном росте обратного тока.

Выпрямительные диоды различных классов отличаются напряжением, временем переключения, рабочей полосой частот.

Основными параметрами выпрямительных диодов являются: U_{RWM} – максимально допустимое обратное напряжение диода; I_F – максимально допустимый прямой ток через диод (постоянная составляющая); U_F – прямое падение напряжения на диоде, при заданном среднем значении прямого тока; P_T – средняя за период мощность, рассеиваемая диодом, при протекании тока в прямом и обратном направлениях; f_{max} – наибольшая частота подводимого напряжения, при которой выпрямитель работает эффективно, а нагрев диода не превышает допустимой величины; C_j – ёмкость P-N перехода.

Порядок выполнения работы

На рис. 1.5 представлены схемы исследования ВАХ диода в прямом включении на базе комплекса LC_2012S (рис. 1.5,*а*) и лабораторного модуля EMST_Analog (рис. 1.5,*б*).

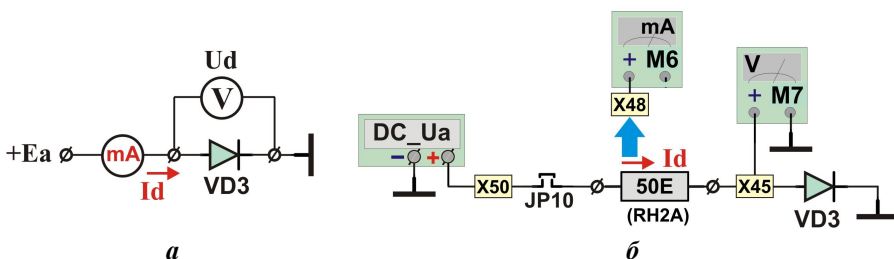
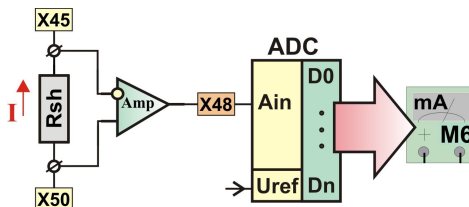


Рис. 1.5. Схемы исследования ВАХ диода в прямом включении

В данной схеме, в качестве измерителя прямого тока диода, используется шунт (R_{sh}), сигнал с которого после усиления и преобразования (рис. 1.6) поступает на виртуальный монитор М6, используемый в режиме миллиамперметра.

Прямое напряжение на исследуемом диоде (с контакта X45) поступает на виртуальный монитор М7 (используемый в режиме вольтметра). Питание схемы осуществляется управляемым источником питания DC_U_a .

Рис. 1.6. Принцип построения измерителя тока в модуле EMST_Analog комплекса LC_2012S



1.1. Подготовить схемы исследования ВАХ диода:

- подключить модуль EMST_Analog к комплексу LC_2012S;
- собрать схему согласно рис. 1.5,б (см. приложение 1, 2);
- тип исследуемого диода выбрать (VD3) 1N4007;
- подключить источник DC_U_a (разъём DB-9 Analog_Out, pin-1) к контакту X50;
- установить джампер JP10 (подключение шунта $R_{sh} = 50$ Ом);
- установить джамперами JP9, JP13 коэффициент усиления измерителя тока $K_u = 1$;
- подключить виртуальный монитор M6 (разъём DB-9 Analog_In, pin-7) к контакту X48;
- подключить к разветвителю (6-pin) модуля EMST_Analog сигналы: виртуальный монитор M7 (разъём DB-9 Analog_In, pin-8), контакт X45 измерителя тока, анод диода VD3.

1.2. Подготовить программный модуль LC_2012S:

- на главной панели программного модуля LC_2012S (рис. 1.7), в закладке [Аналоговые инструменты] выбрать управляемый источник постоянного напряжения DC_U_a ;

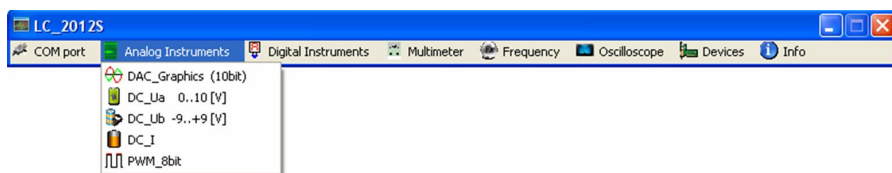


Рис. 1.7. Главная панель программного модуля LC_2012S. Закладка [Analog Instruments]

- на панели DC_U_a установить диапазон выходного напряжения $U_a = 0 \dots 10$ В;
- на главной панели программного модуля LC_2012S выбрать закладку [Multimeter] (рис. 1.8);
- активировать виртуальный монитор M6 для измерения тока с параметрами: $I_d = 0 \dots 100$ мА, $R_{sh} = 50$ Ом, $K_u = 1$;

- активировать виртуальный монитор M7 для измерения напряжения в диапазоне $U_d = 0 \dots 5$ В.

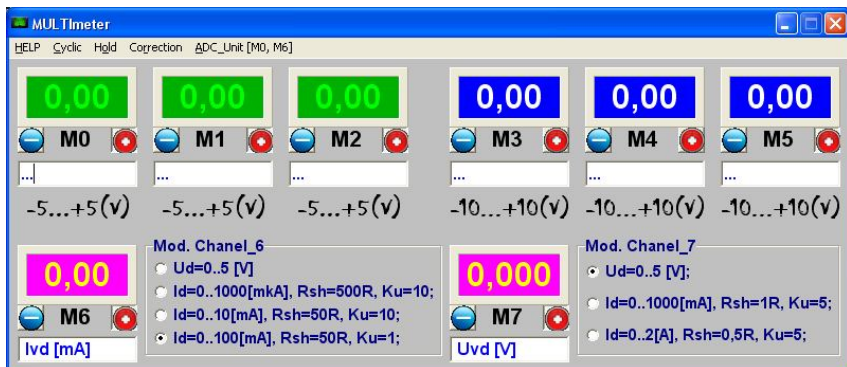


Рис. 1.8. Панель [Multimeter] программного модуля LC_2012S

1.3. Снять ВАХ при прямом включении диода:

- задать значения источника DC_U_a виртуальным слайдером, фиксируя значения параметров U_F и I_F в табл. 1.1 (15 – 20 замеров);

Таблица 1.1

DC_U_a , В	U_F , В	I_F , мА
...	...	...

- выбрать значения прямого тока диода $I_F = 0 \dots 45$ мА;
- после выполнения измерения установить значения источника $U_a = 0$ В.

1.4. Подготовить схемы для снятия ВАХ при обратном включении диода:

- для подготовки схемы (рис. 1.9) необходимо поменять местами проводники анод-катод диода VD3;

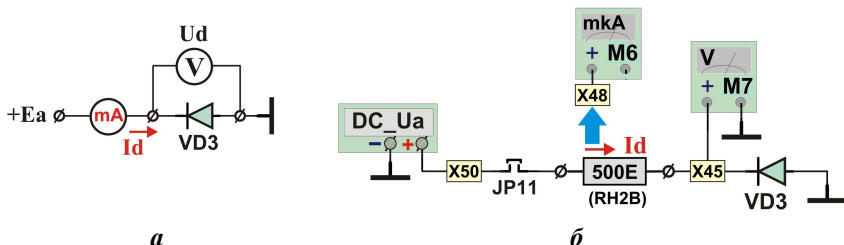


Рис. 1.9. Схемы исследования ВАХ диода в обратном включении

- отключить джампер JP10 (шунт $R_{sh} = 50$ Ом);
- установить джампер JP11 (подключение шунта $R_{sh} = 500$ Ом);

- установить джамперами JP9, JP13 коэффициент усиления измерителя тока $K_u = 10$;
- активировать виртуальный монитор M6 для измерения тока (рис. 1.10) с параметрами: $I_d = 0 \dots 1000$ мкА, $R_{sh} = 500$ Ом, $K_u = 10$.



Рис. 1.10. Настройки панели [Multimeter]

1.5. Снять ВАХ при обратном включении диода:

- последовательно установить значения источника DC_U_a виртуальным слайдером (с шагом 1.0 В) в диапазоне $0 \dots 10$ В. Значения параметров U_R и I_R заносятся в табл. 1.2;
- после выполнения измерения установить значения источника $U_a = 0$ В.

Таблица 1.2

DC_U_a , В	U_R , В	I_R , мкА
...	...	...

1.6. Подготовить к защите отчёт:

- знать принцип действия P-N перехода и основные электрические параметры диодов;
- заполнить таблицы 1.1, 1.2;
- по полученным данным построить ВАХ исследуемого диода;
- написать выводы по результатам проделанной работы.

Лабораторная работа № 2

ИССЛЕДОВАНИЕ СТАБИЛИТРОНА. ПАРАМЕТРИЧЕСКИЙ СТАБИЛИЗАТОР

Цель работы: изучить структуру и принцип действия полупроводникового стабилитрона. На базе лабораторного комплекса LC_2012S снять вольт-амперные характеристики стабилитрона и практически исследовать параметрический стабилизатор. Научиться производить выбор и расчёт элементов параметрического стабилизатора.

Теоретические сведения

Стабилитрон – полупроводниковый прибор (рис. 2.1), выполняющий функцию поддержания постоянства напряжения в цепях питания радио-

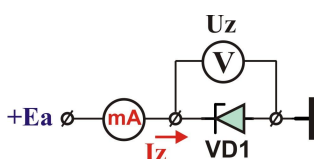


Рис. 2.1. Схематехническое изображение стабилитрона

электронной аппаратуры, и работающий в режиме электрического пробоя. В этом режиме, при значительном изменении тока, протекающего через стабилитрон, напряжение на нём практически не меняется.

По устройству и принципу работы кремниевые стабилитроны широкого применения аналогичны плоскостным выпрямительным диодам. Но работает стабилитрон на обратной ветви вольт-амперной характеристики (рис. 2.2, область III), где незначительное обратное напряжение вызывает значительное увеличение обратного тока через прибор.

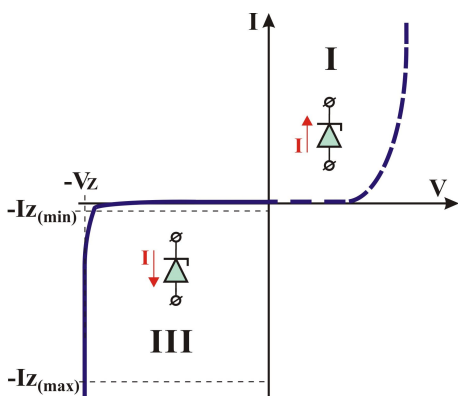


Рис. 2.2. ВАХ стабилитрона

Напряжение на стабилитрон подают в обратной полярности, т. е. включают так, чтобы его анод был соединен с отрицательным полюсом источника питания. При таком включении через стабилитрон течет обратный ток ($-I_z$). По мере увеличения обратного напряжения, обратный ток растет очень медленно – характеристика идет почти параллельно оси $-U$. Но при некотором напряжении $-U_z$, P-N переход стабилитрона пробивается и через него начинает течь значительный обратный ток.

Напряжение на стабилитрон подают в обратной полярности, т. е. включают так, чтобы его анод был соединен с отрицательным полюсом источника питания. При таком включении через стабилитрон течет обратный ток ($-I_z$). По мере увеличения обратного напряжения, обратный ток растет очень медленно – характеристика идет почти параллельно

но оси $-U$. Но при некотором напряжении $-U_z$, P-N переход стабилитрона пробивается и через него начинает течь значительный обратный ток.

Теперь вольт-амперная характеристика резко поворачивает и идет вниз почти параллельно оси тока. Этот участок и является для стабилитрона рабочим. Пробой P-N перехода не ведёт к порче прибора, если ток через него не превышает некоторого допустимого значения $-I_{z\max}$.

Основными параметрами стабилитрона являются: U_z – номинальное напряжение стабилизации (Nominal Zener Voltage), которое создается между выводами стабилизатора в рабочем режиме; P_D – максимально-допустимая рассеиваемая мощность на стабилитроне (Power Dissipation); $I_{z\max}$ – максимально допустимый ток стабилизации (Max Regulator Current), т.е. наибольший ток через стабилитрон, при котором температура его P-N перехода не превышает допустимой; $I_{z\min}$ – минимальный ток стабилизации (Min Regulator Current), т.е. наименьший ток, протекающий через стабилитрон, при котором начинается устойчивая работа в режиме пробоя; I_{zn} – номинальный ток стабилизации; Z_{ZT} – дифференциальное сопротивление стабилитрона на участке пробоя (Max Zener Impedance); T_J – допустимая рабочая температура корпуса стабилитрона (Operating junction temperature); α_{VZ} – температурный коэффициент напряжения стабилизации при заданном токе стабилизации (Temperature coefficient at I_{ZT}).

Порядок выполнения работы

2.1. Подготовить схемы исследования ВАХ стабилитрона:

- подключить модуль EMST_Analog к комплексу LC_2012S;
- собрать схему согласно рис. 2.3;

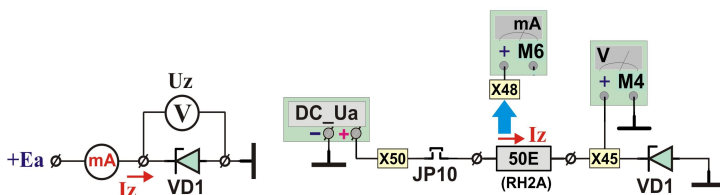


Рис. 2.3. Схема исследования ВАХ стабилитрона в обратном включении

- выбрать исследуемый стабилитрон VD1 (тип Z1SMA5V6);
- подключить источник DC_U_a (разъём DB-9 Analog_Out, pin-1) к контакту X50;
- установить джампер JP10 (подключение шунта $R_{sh} = 50 \text{ OM}$);
- установить джамперами JP9, JP13 коэффициент усиления измерителя тока $K_u = 1$;
- подключить виртуальный монитор M6 (разъём DB-9 Analog_In, pin-7) к контакту X48;

- активировать виртуальный монитор М6 для измерения тока с параметрами: $I_d = 0 \dots 100$ мА, $R_{sh} = 50$ Ом, $K_u = 1$;
- подключить виртуальный монитор М4 (разъём DB-9 Analog_In, pin-8) к контакту X45;

Подготовка программного модуля LC_2012S производится аналогично пункту 1.2.2.

2.2. Снять ВАХ стабилитрона при обратном включении:

Таблица 2.1

DC_ U_a , В	U_z , В	I_z , мА
...	...	...

- задать значения источника DC_ U_a виртуальным слайдером, фиксируя значения параметров U_z и I_z в табл. 2.1 (15 – 20 замеров);

- задать значения источника DC_ $U_a = 0 \dots 10$ В;

- после выполнения измерения установить значения источника $U_a = 0$ В.

2.3. Рассчитать элементы схемы параметрического стабилизатора.

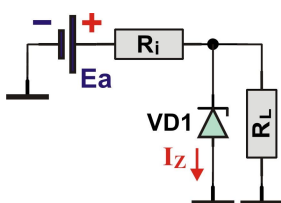


Рис. 2.4. Параметрический стабилизатор

На рис. 2.4 приведена схема параметрического стабилизатора напряжения (ПЧН), широко применяемого в схемотехнике.

При таком включении через стабилизатор VD1 течет обратный ток I_z , создающийся источником питания E_a , напряжение которого может изменяться в значительных пределах. Под действием этого напряжения ток I_z , текущий через стабилитрон, тоже изменяется, а напряжение на подключенной параллельно к нему нагрузке R_L остаётся практически неизменным (стабильным). Резистор R_i ограничивает максимально допустимый ток, текущий через стабилитрон VD1.

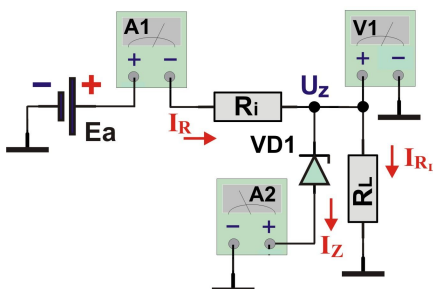


Рис. 2.5. Распределение токов в схеме параметрического стабилизатора

Для выбора элементов стабилизатора рассмотрим схему, приведенную на рис. 2.5.

Входящий ток I_R , поступающий от источника E_a , после прохождения через ограничительный резистор R_i ,

разветвляется на две ветви: I_Z – ток, протекающий непосредственно через стабилитрон VD1, и I_{RL} – ток, протекающий через нагрузку R_L :

$$I_R = I_Z + I_{RL}. \quad (2.1)$$

Исходным параметром для расчёта схемы является ток нагрузки стабилизатора I_{RL} .

Если входное напряжение E_a (или диапазон ΔE_a) не задан, то его минимальное значение следует выбрать согласно выражению (2.2). Верхний предел входного напряжения будет зависеть от номинала ограничительного резистора R_i и параметра I_{Zmax} используемого стабилитрона.

$$E_{a \min} \geq U_Z + (1,5 \dots 2 \text{ В}). \quad (2.2)$$

Далее необходимо выбрать номинальный ток стабилитрона

$$2I_{RL} \leq I_Z < I_{Zmax}. \quad (2.3)$$

Если значение резистора R_i задано, то значение номинального тока можно проверить по выражению (2.4) на соответствие рекомендациям (2.3)

$$I_Z = \frac{E_a - U_Z}{R_i} - I_{RL}, \quad (2.4)$$

таким образом, расчёт R_i можно произвести по выражению

$$R_i = \frac{E_a - U_Z}{I_Z + I_{RL}}. \quad (2.5)$$

Приращение тока через стабилитрон при изменении входного напряжения, необходимого для контроля значения параметра I_{Znom} в допустимых пределах, рассчитывается по формуле

$$\Delta I_Z = \frac{\Delta E_a}{R_i}. \quad (2.6)$$

Для исследования схемы ПСН, необходимо применить ранее рассмотренный в п. 2.1 стабилитрон серии Z1SMA5V6 с параметрами: $U_Z = 5,6 \text{ В}$, $I_{Zmax} = 178 \text{ мА}$, $P_D = 1 \text{ Вт}$.

Произвести выбор элементов схемы согласно рис. 2.6. и рекомендациям 2.1–2.3.

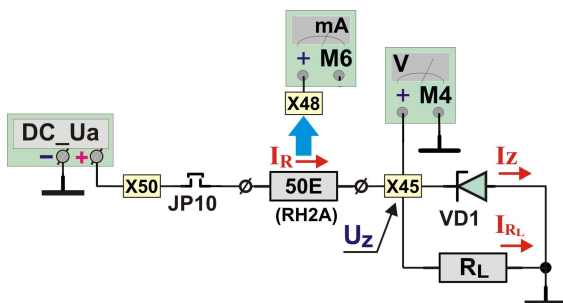


Рис. 2.6. Схема исследования параметрического стабилизатора

Выбрать ток нагрузки $I_{RL} = 20$ мА; диапазон входного напряжения $U_a = 6 \dots 10$ В.

При использовании в качестве ограничительного резистора шунта номиналом $R_{sh} = 50$ Ом провести проверочный расчет номинального тока I_{znom} и приращения тока ΔI_z по формулам (2.4) и (2.6), а также допустимой мощности P_D по формуле

$$P_D = (I_z + \Delta I_z) U_z.$$

2.4. Подготовить схемы и программную часть для исследования ПСН:

- согласно рис. 2.6, подключить элемент нагрузки $R_L = 300$ Ом к ПСН, который обеспечит заданный ток нагрузки $I_{RL} = 20$ мА при $U_z = 5,6$ В;
- повторить остальные действия согласно п. 2.2.

2.5. Провести практическое исследование ПСН:

- задать значения источника DC_U_a виртуальным слайдером, фиксируя значения параметров U_z и I_R в табл. 2.2 (15 – 20 замеров);

Таблица 2.2

U_a , В	U_z , В	I_R , мА	I_z , мА	I_{RL} , мА
...	...	...	...	...

- задать значения источника $DC_U_a = 0 \dots 10$ В;
- после выполнения измерения установить значения источника $U_a = 0$ В.

2.6. Подготовить к защите отчёт:

- знать принцип действия стабилизатора и параметрического стабилизатора;
- знать основные электрические параметры стабилизатора;
- заполнить таблицу 2.1;
- по полученным данным построить ВАХ рабочей зоны исследуемого стабилизатора;
- заполнить таблицу 2.2, произвести расчёт токов I_Z , I_{RL} , используя зависимость (2.1);
- по полученным данным построить проходную характеристику $U_Z = f(U_a)$ ПСН;
- написать выводы по результатам проделанной работы.

Лабораторная работа № 3

ВЫПРЯМИТЕЛИ. СГЛАЖИВАЮЩИЕ ФИЛЬТРЫ

Цель работы: изучение принципа действия выпрямителя, сглаживающего фильтра как основных узлов источника питания при работе на активную нагрузку. Практически исследовать однополупериодную и мостовую схемы выпрямителей.

Теоретические сведения

Для питания электронных устройств и приборов требуется постоянное напряжение различной величины. Наиболее распространёнными источниками вторичного электропитания являются источники, которые преобразуют энергию сети переменного тока частотой 50 Гц (рис. 3.1).

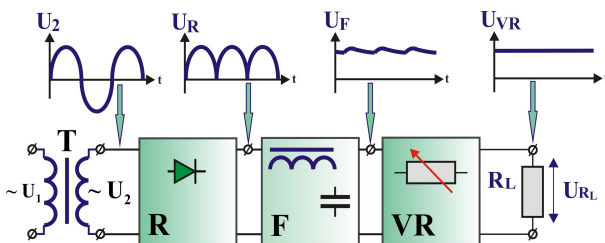


Рис. 3.1. Функциональная схема источника питания

Источники питания должны обеспечивать: допустимый уровень переменных составляющих в выходном постоянном напряжении; стабильность выходного напряжения (или тока) при изменении напряжения сети или тока нагрузки, заданную экономичность; устойчивость к перегрузкам и коротким замыканиям выходных зажимов; работоспособность в определенном диапазоне температур.

Трансформатор Т служит для преобразования переменного напряжения U_1 (сети или от другого источника) в необходимое по амплитуде переменное напряжение U_2 , а также для осуществления гальванической развязки источника питания от сети.

Выпрямитель R (rectifier) состоит из одного или нескольких соединённых по определённой схеме диодов, обеспечивающих в нагрузочном устройстве ток одного направления. Преобразует переменное напряжение U_2 в постоянное пульсирующее напряжение U_R .

Сглаживающий фильтр F (filter) преобразует постоянное пульсирующее напряжение U_R в напряжение U_F с небольшими пульсациями, которое может быть использовано для питания каскадов аппаратуры, нормально работающих при незначительных пульсациях.

Стабилизатор напряжения VR (voltage regulator), предназначен для окончательного сглаживания пульсаций выходного напряжения U_{RL} , и поддержания его неизменным в заданных пределах при колебании напряжения сети U_1 и изменении тока I_{RL} нагрузки.

R_L – сопротивление нагрузки (load resistance) источника питания.

Рассмотрим классические схемы выпрямителей, используемых при проектировании модулей питания радиоэлектронной аппаратуры. При изображении схем и временных диаграмм используются стандартные технические аббревиатуры и обозначения: I_{RMS} , U_{RMS} – действующие или средне-квадратические (Root mean square, RMS) значения тока и напряжения; I_p , U_p – амплитудное или пиковое значение (peak value) тока и напряжения; I_{ARV} , U_{ARV} – среднее выпрямленное значение (average rectified value) тока и напряжения; T_{ACV} – период сетевого напряжения (для промышленной сети $T_{ACV} = 20$ мс).

В схеме **однополупериодного выпрямителя** (рис. 3.2) в цепь вторичной обмотки трансформатора последовательно включен диод VD и нагрузка R_L . В качестве элемента фильтра используется конденсатор C_F , коммутируемый переключателем К1.

В течение положительного полупериода на интервале $t_0 - t_3$ (рис. 3.3, а) ток нагрузки I_{RL} проходит по цепи: вывод А трансформатора Т, диод VD, резистор R_L , общий провод, вывод В. При отсутствии фильтрующего конденсатора C_F , на нагрузке формируются положительные полупериоды синусоидального напряжения U_{RL} (рис. 3.3, б). Форма тока будет повторять форму напряжения. В течение отрицательного полупериода на интервале $t_3 - t_4$ диод VD закрыт. В цепи нагрузки протекает малый обратный ток I_r диода VD, максимальное обратное напряжение на котором будет равно амплитуде напряжения U_p

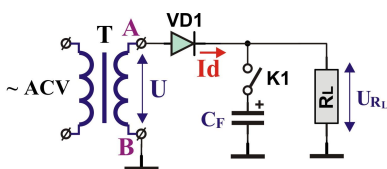


Рис. 3.2. Однополупериодный выпрямитель

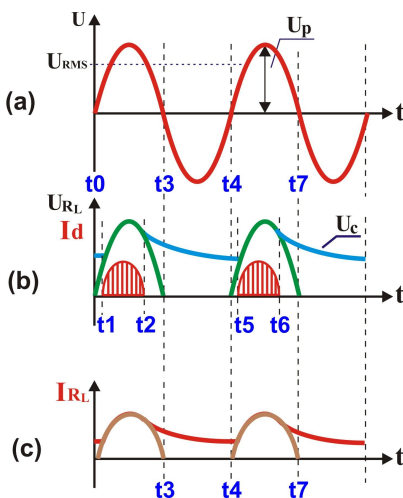


Рис. 3.3. Временные диаграммы однополупериодного выпрямителя

(рис. 3.3,*а*) вторичной обмотки трансформатора. Следовательно, в интервале 10 мс, напряжение на нагрузке будет равно нулю. Также, в течение отрицательного полупериода, при наличии фильтрующего конденсатора C_F , на нагрузке формируется сглаженное напряжение U_C , определяемое временем разряда конденсатора C_F и величиной нагрузки R_L на интервале $t_2 - t_5$ (рис. 3.3,*б*). Так как диод VD закрыт, энергия в нагрузку будет поступать с конденсатора фильтра.

Заряд конденсатора C_F будет происходить на интервале $t_1 - t_2$ (рис. 3.3,*б*) при наличии положительного полупериода на вторичной обмотке трансформатора при открытом диоде VD.

Основным преимуществом однополупериодного выпрямителя является его простота. Анализ электрических параметров позволяет сделать вывод о недостатках этого выпрямителя: большой коэффициент пульсаций, малые значения выпрямленного тока и напряжения.

$$U_{RL(ARV)} = \frac{\sqrt{2}U_{RMS}}{\pi} \approx 0,45U_{RMS}; \quad (3.1)$$

$$I_{RL(ARV)} = \frac{0,45U_{RMS}}{R_L}. \quad (3.2)$$

Коэффициент пульсаций $p = 1,57$; частота пульсаций $F_p = 50$ Гц.

Двухполупериодные выпрямители бывают двух типов: мостовыми и с выводом средней точки вторичной обмотки трансформатора. Эти выпрямители являются более мощными, чем однополупериодные, так как с их помощью нагрузочные устройства используют для своего питания оба полупериода напряжения сети. Они свободны от недостатков, свойственных однополупериодным выпрямителям, и имеют более высокий КПД.

Наибольшее распространение получил *двухполупериодный мостовой выпрямитель* (рис. 3.4). Он состоит из четырёх диодов, подключенных к вторичной обмотке трансформатора по мостовой схеме. К одной из диагоналей моста подсоединяется вторичная обмотка трансформатора, а к другой – нагрузочный резистор R_L .

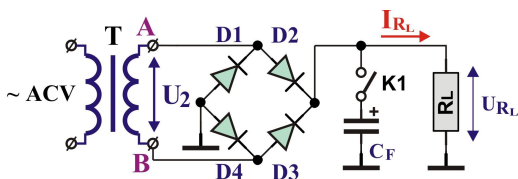


Рис. 3.4.
Двухполупериодный
выпрямитель

Каждая пара диодов (D_2, D_4 и D_1, D_3) работает поочередно. Диоды D_2, D_4 открыты в первый (положительный) полупериод напряжения U_2 вторичной обмотки трансформатора на интервале $t_0 - t_2$ (рис. 3.5, а), когда потенциал точки А выше потенциала точки В. При этом, в нагрузочном резисторе R_L появляется ток I_{RL} . В этом интервале диоды D_1, D_3 закрыты.

В следующий (отрицательный) полупериод напряжения вторичной обмотки (интервал $t_2 - t_4$) потенциал точки В выше потенциала точки А, диоды D_1, D_3 открыты, а диоды D_2, D_4 закрыты. В оба полупериода, ток I_{RL} через нагрузочный резистор R_L имеет одно и то же направление.

При наличии конденсатора фильтра CF, пульсации напряжения (провалы до нуля в точках t_0, t_2, t_4) сглаживаются за счёт накопленной в конденсаторе энергии, которая подпитывает нагрузку в интервале $t_1 - t_3$ (рис. 3.5, б). Результирующее напряжение U_C (на нагрузке) характеризует периодический заряд-разряд конденсатора фильтра. Чем больше его ёмкость, тем меньше наклон кривой на участке $t_1 - t_3$ и больше время разряда конденсатора π (отрезок $t_1 - t_5$), что и приводит к уменьшению пульсаций выпрямленного напряжения.

Частота пульсаций выпрямленного напряжения в мостовой схеме, как и в двухполупериодной, равна удвоенной частоте сети:

$$U_{RL(ARV)} = \frac{\sqrt{2}U_{RMS}}{\pi} \approx 0,9U_{RMS}; \quad (3.3)$$

$$I_{RL(ARV)} = \frac{0,9U_{RMS}}{R_L}. \quad (3.4)$$

Коэффициент пульсаций $p = 0,67$; частота пульсаций $F_p = 100$ Гц.

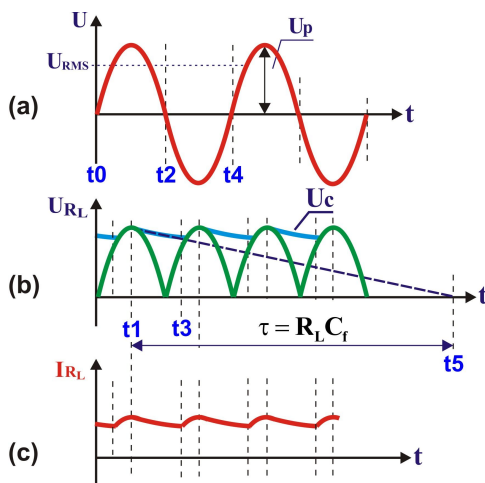


Рис. 3.5. Временные диаграммы двухполупериодного мостового выпрямителя

Порядок выполнения работы

3.1. Подготовить схему и программный модуль для исследования однополупериодного выпрямителя:

- подключить модуль EMST_Analog к комплексу LC_2012S;
- собрать схему, согласно рис. 3.6;

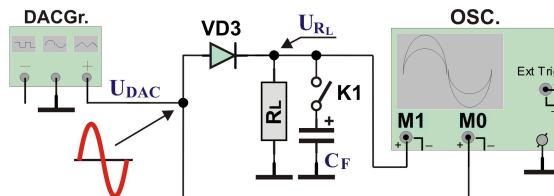


Рис. 3.6. Схема исследования однополупериодного выпрямителя

- выбрать тип исследуемого диода (VD3) 1N4007;
- задать тип нагрузки $R_L = R_{11} = 5,6 \text{ кОм}$;
- подключить источник входного сигнала U_{DACf} (разъём DB-9 Analog_Out, pin-3);
- для контроля сигнала U_{DACf} подключить виртуальный монитор M0 (разъём DB-9 Analog_In, pin-1);
- для контроля выходного напряжения выпрямителя U_{RL} подключить виртуальный монитор M1 (разъём DB-9 Analog_In, pin-2);
- на главной панели программного модуля LC_2012S, в закладке [Analog Instruments] выбрать управляемый источник DAC_Graphics (рис. 3.7);

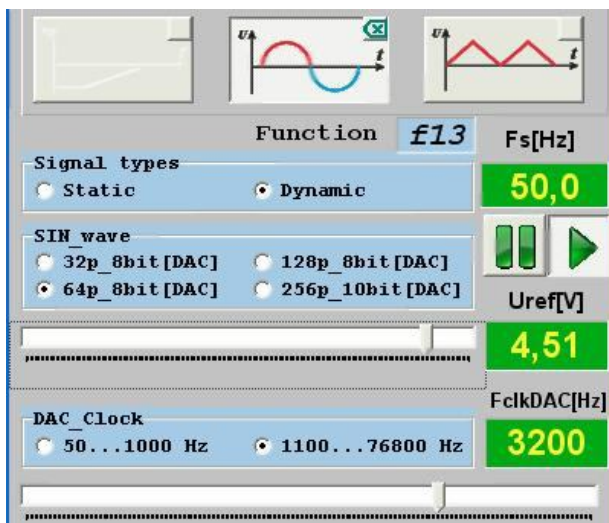


Рис. 3.7. Панель опций аналогового инструмента [DAC_Graphics]

- выбрать прессет сигнала Sin-Wave (Function F13);
- выбрать тип сигнала (Signal types – Dynamic);
- задать 64 точки на период (Sin_wave – 64p_8bit DAC);
- задать диапазон DAC_Clock 1100...76800 Гц;
- задать частоту синусоидального сигнала 50 Гц ($F_{clkDAC} = 3200$ Гц);
- задать амплитуду синусоидального сигнала 4,5 В (U_{refDAC});
- на главной панели программного модуля LC_2012S, в закладке [Oscilloscope] выбрать тип используемого графопостроителя [FtPlotter] и установить следующие опции: ADC clock – 115200 Hz; Channel – M0 & M1; ADC maxp – 256 pixels per frame.

3.2. Практическое исследование однополупериодного выпрямителя.

После запуска генератора [DAC_Graphics] (при отключенном конденсаторе фильтра) на мониторе [FtPlotter] отображаются два сигнала: U_{DACf} (зелёный цвет) с пиковым значением U_{p1} , и сигнал U_{RL} (жёлтый цвет) с пиковым значением U_{p2} (рис. 3.8).

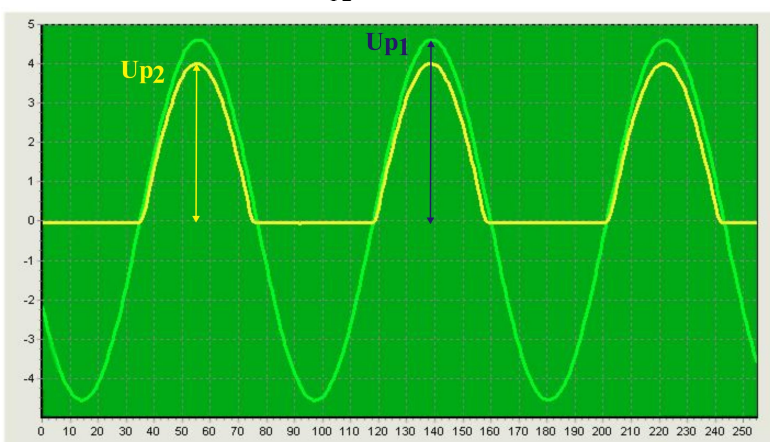


Рис. 3.8. Осциллограммы работы однополупериодного выпрямителя при отсутствии конденсатора фильтра

Как видно из осциллограммы, амплитудные значения сигналов отличаются на величину прямого падения напряжения на выпрямительном диоде U_F , в данном случае $U_F = 0,6...0,7$ В.

Частота пульсаций выпрямленного напряжения будет соответствовать частоте входного сигнала U_{DACf} , $F_{DAC} = 50$ Гц.

Рассмотрим влияние конденсатора фильтра (рис. 3.9) на форму выходного напряжения U_{RL} (на выходе выпрямителя).

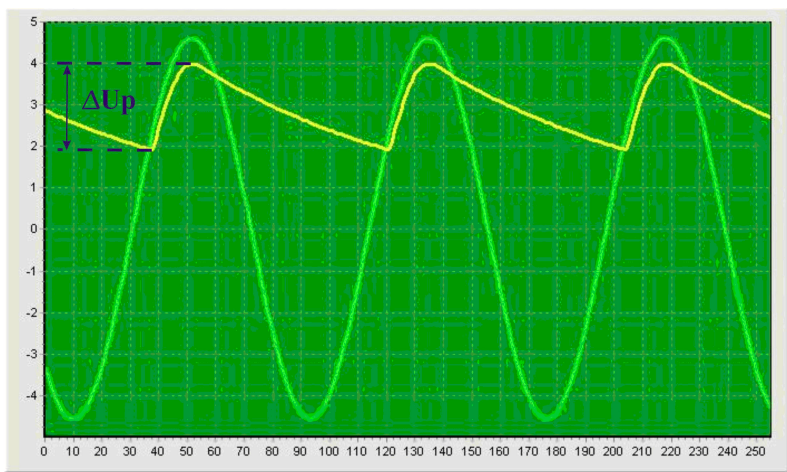


Рис. 3.9. Осциллограммы работы однополупериодного выпрямителя при наличии конденсатора фильтра

При этом используются рекомендуемые табл. 3.1 значения ёмкостей:

Таблица 3.1

C_F , мкФ	ΔU_p , В	U_p , В
C15 / 22,0		
C16 / 47,0		
C17 / 100		
C18 / 220		
C19 / 470		

3.3. Подготовить схему и программный модуль для исследования двух полупериодного выпрямителя:

- подключить модуль EMST_Analog к комплексу LC_2012S;
- собрать схему согласно рис. 3.10;

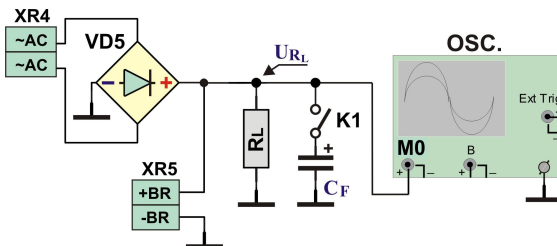


Рис. 3.10. Схема исследования 2-х полупериодного выпрямителя

- выбрать тип исследуемого диодного моста VD5 (W10M);
- задать тип нагрузки $R_L = R7 = 560 \text{ Ом}$;
- подключить источник переменного напряжения AC $\sim 10 \text{ В}$ с панели модуля LC_2012S_PWR к разъёму XR4 (см. приложение 3);
- для контроля выходного напряжения выпрямителя U_{RL} , подключить виртуальный монитор M0 (разъём DB-9 Analog_In, pin-1);
- на главной панели программного модуля LC_2012S, в закладке [Oscilloscope] выбрать тип используемого графопостроителя [FtPlotter] и установить следующие опции: ADC clock – 230400 Гц; Channel – M0 & M1; ADC maxp – 256 pixels per frame.

3.4. Выполнить практическое исследование 2-х полупериодного выпрямителя:

- при отсутствии конденсатора фильтра, используя виртуальный монитор FtPlotter, необходимо снять сигнал U_{RL} (на выходе выпрямителя);
- рассмотреть влияние конденсатора фильтра на форму выходного напряжения U_{RL} (на выходе выпрямителя). При этом используются рекомендуемые табл. 3.1 значения ёмкостей.

3.5. Подготовить к защите отчёт:

- знать назначение основных узлов источника питания: выпрямителя, сглаживающего фильтра, стабилизатора напряжения;
- знать принцип работы и особенности однополупериодной и 2-х полупериодной схем выпрямителей;
- по полученным осциллограммам работы однополупериодного выпрямителя определить амплитудное значение U_p и размах пульсаций ΔU_p при каждом значении ёмкости конденсатора фильтра. Данные заносятся в таблицу 3.1;
- по полученным осциллограммам работы 2-х полупериодного выпрямителя определить амплитудное значение U_p и размах пульсаций ΔU_p при каждом значении ёмкости конденсатора фильтра. Данные заносятся в таблицу 3.2;
- написать выводы по результатам проделанной работы.

Лабораторная работа № 4

БИПОЛЯРНЫЙ ТРАНЗИСТОР.

СТАТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ТРАНЗИСТОРА

Цель работы: изучить биполярный транзистор, основные схемы включения ОЭ, ОБ, ОК. На базе лабораторного комплекса LC_2012S снять входные и выходные статические характеристики биполярного транзистора, приобрести навыки в определении h -параметров.

Теоретические сведения

Структура биполярного транзистора. Транзистор – полупроводниковый элемент с тремя электродами, который служит для усиления или переключения сигнала. Биполярные транзисторы управляются током и отличаются по типу: NPN и PNP. Его можно представить двумя противоположно включенными диодами, которые обладают одним общим N- или P-слоем. Электрод, связанный с ним, называется базой (В). Два других электрода называются эмиттером (Е) и коллектором (С). Такие транзисторы называют биполярными, потому что перенос тока

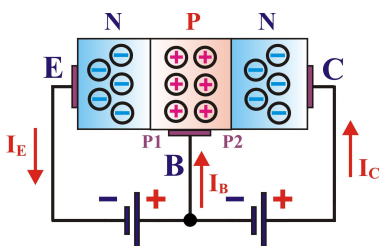


Рис. 4.1. Структура NPN-транзистора

в них осуществляется носителями заряда двух типов – электронами и дырками (рис. 4.1). Биполярный транзистор имеет два PN перехода: эмиттерный и коллекторный. При этом образуются два запирающих слоя p_1 и p_2 , с контактными разностями потенциалов.

Когда эмиттерный ток I_E равен нулю, небольшой ток в транзисторе I_{C0} через коллекторный переход обусловлен

движением только неосновных носителей заряда (дырок из коллектора в базу, электронов из базы в коллектор).

При подключении эмиттера к отрицательному зажиму источника питания возникает эмиттерный ток I_E . Так как внешнее напряжение приложено к эмиттерному переходу в прямом направлении, электроны преодолевают переход и попадают в область базы. База выполнена из P-полупроводника, поэтому электроны являются для неё неосновными носителями заряда.

Электроны, попавшие в область базы, частично рекомбинируют с дырками базы. Так как базу обычно выполняют очень тонкой из P-полупроводника с большим удельным сопротивлением (малым

содержанием примеси), поэтому концентрация дырок в базе низкая и лишь немногие электроны, попавшие в базу, рекомбинируют с ее дырками, образуя базовый ток I_B . Большинство же электронов в следствии теплового движения (диффузия) и под действием поля коллектора (дрейф) достигают коллектора, образуя составляющую коллекторного тока I_C . Концентрация основных носителей заряда самая высокая в эмиттере и малая – в базе. В коллекторной области она может быть такой же, как в эмиттере. База является электродом, с помощью которого можно регулировать ток, идущий через транзистор, и, управляя мощностью внешнего источника напряжения, усиливать электрические сигналы.

Основная особенность транзистора состоит в том, что коллекторный ток I_C является кратным базовому току I_B .

Отношение

$$\beta = \frac{I_C}{I_B} \quad (4.1)$$

называют коэффициентом усиления по току. Также для транзистора справедливо соотношение

$$I_E = I_B + I_C. \quad (4.2)$$

Способы включения транзисторов. Электроды транзисторов своими выводами подключаются к источникам постоянной ЭДС так, чтобы образовались две электрические цепи: входная и выходная.

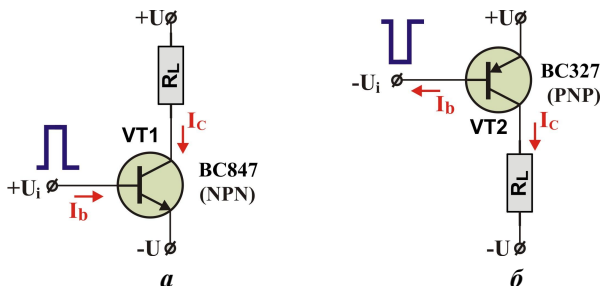


Рис. 4.2. Транзисторы в активном режиме структуры:
а – NPN; б – PNP

Существует три основные схемы включения транзисторов. При этом один из электродов транзистора является *общей точкой* для входа и выхода каскада.

В зависимости от того, какой из электродов является *общим* для входной и выходной цепи, различают три способа включения транзистора: с общей базой (ОБ), с общим эмиттером (ОЕ) и с общим коллектором (ОК).

Любая из выше перечисленных схем включения транзистора характеризуется двумя основными показателями:

- коэффициентом усиления по току

$$K_1 = \frac{I_0}{I_i}; \quad (4.3)$$

- входным сопротивлением каскада

$$R_i = \frac{U_i}{I_i}. \quad (4.4)$$

Статические вольт-амперные характеристики биполярных транзисторов. Вольт-амперные статические характеристики биполярных транзисторов – графические зависимости между токами и напряжениями во входных и выходных цепях транзистора, служащие для оценки его свойств.

На рис. 4.3 приведен основной вид входных и выходных характеристик, полученных опытным путем для транзистора, включенного по схеме с общим эмиттером.

Зависимость между током и напряжением во входной цепи транзистора $I_b = f(U_{be})$, при $U_{ce} = \text{const}$ называют *входной характеристикой* (рис. 4.3,*а*). При $U_{ce} = 0$ вольтамперная характеристика аналогична прямой ветви характеристики диода. С ростом напряжения на базе, ток базы экспоненциально изменяется, переходя в линейную зависимость при сравнительно большом его значении.

Зависимости тока коллектора I_c от напряжения между коллектором и эмиттером (U_{ce}), при фиксированных значениях тока базы I_b , называют семейством *выходных характеристик* транзистора: $I_c = f(U_{ce})$, при $I_b = \text{const}$ (рис. 4.3,*б*).

При малых напряжениях на коллекторе (0,2...0,3 В) ток коллектора I_c не зависит от тока базы I_b и характеристики сливаются в одну линию (область насыщения). При увеличении напряжения на коллекторе становится заметным рост коллекторного тока, что объясняется большой зависимостью коэффициента передачи тока базы $h_{21э}$ от U_{ce} , а также

эффектом модуляции толщины базы (эффект Эрли), заключающемся в сужении области базы с расширением коллекторного перехода при увеличении обратного напряжения U_{ce} . Уменьшение толщины базы за счет расширения коллекторного перехода обуславливает снижение числа рекомбинаций неосновных носителей в базе и, следовательно, рост токов базы и коллектора. (*Рекомбинация* – взаимодействие заряженных частиц противоположного знака, приводящее к образованию нейтральных атомов или молекул).

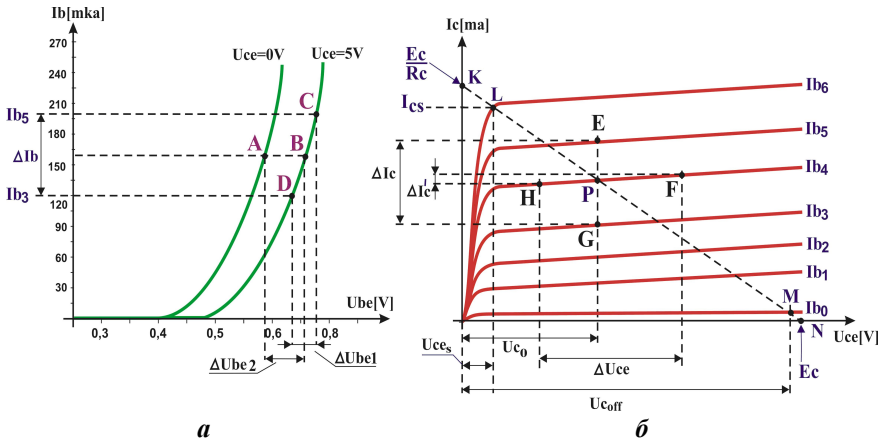


Рис. 4.3. Характеристики транзистора для схемы ОЕ:

а – входные; *б* – выходные

Через точки KN проведена нагрузочная прямая. Точка К соответствует значениям $U_{ce} = 0$,

$$I_c = \frac{E_c}{R_c}, \quad (4.5)$$

где E_c – питание каскада (в данном случае коллекторной цепи); R_c – сопротивление нагрузки каскада (в цепи коллектора). Точка N соответствует значениям $I_c = 0$, $U_{ce} = E_c$.

Точка пересечения нагрузочной прямой со статической характеристикой при заданном входном токе, например, I_{b4} , определяемом источником смещения E_b , называется *рабочей точкой*. При этом начальное положение её на нагрузочной прямой (при отсутствии входного переменного сигнала) называется *точкой покоя* – Р. Точка покоя определяет ток покоя выходной цепи I_{C0} и напряжение покоя U_{C0} . Уравнение

динамического режима в точке покоя имеет вид:

$$U_{c0} = E_c - I_{c0} R_c. \quad (4.6)$$

Для расчёта и анализа устройств с биполярными транзисторами используют так называемые *h-параметры* транзистора, включенного по схеме с общим эмиттером. Электрическое состояние такого транзистора характеризуется четырьмя величинами: I_b , U_{be} , I_c , U_{ce} .

Две из этих величин можно считать независимыми, а две другие могут быть выражены через них. Из практических соображений в качестве независимых удобно выбирать I_b и U_{ce} .

Тогда

$$U_{be} = f_1(I_b, U_{ce}); \quad (4.7)$$

$$I_c = f_2(U_{ce}, I_b). \quad (4.8)$$

В пределах линейной части характеристик для приращений ΔU_{be} и ΔI_c справедливы равенства:

$$\Delta U_{be} = h_{11e} \Delta I_b + h_{12e} \Delta U_{ce}; \quad (4.9)$$

$$\Delta I_c = h_{21e} \Delta I_b + h_{22e} \Delta U_{ce}. \quad (4.10)$$

Параметр h_{11e} имеет размерность сопротивления и представляет собой *входное сопротивление биполярного транзистора*

$$h_{11e} = \frac{\Delta U_{be1}}{\Delta I_b}, \text{ при } U_{ce} = \text{const}. \quad (4.11)$$

Параметр h_{12e} – безразмерный *коэффициент внутренней обратной связи по напряжению*. Его значения лежат в пределах 0,002 – 0,0002:

$$h_{12e} = \frac{\Delta U_{be2}}{\Delta U_{ce}}, \text{ при } I_b = \text{const}. \quad (4.12)$$

Параметр h_{21e} – безразмерный *коэффициент передачи тока*, характеризующий усилительные (по току) свойства транзистора при постоянном напряжении на коллекторе

$$h_{21e} = \frac{\Delta I_c}{\Delta I_b}, \text{ при } U_{ce} = \text{const}. \quad (4.13)$$

Параметр h_{22e} имеет размерность проводимости и характеризует *выходную проводимость* транзистора при постоянном токе базы.

$$h_{22e} = \frac{\Delta I'_c}{\Delta U_{ce}}, \text{ при } I_b = \text{const.} \quad (4.14)$$

Порядок выполнения работы

4.1. Снять входные статические характеристики транзистора $I_B = f(U_{BE})$, при $U_{CE} = \text{const}$ по схеме ОЕ:

- подключить модуль EMST_Analog к комплексу LC_2012S;
- собрать схему согласно рис. 4.4, *а* (см. Приложения 1, 2);
- выбрать тип исследуемого транзистора VT3 (BC337, NPN);
- в качестве входного источника напряжения (в цепи базы) использовать источник DC_ U_a (разъём DB-9 Analog_Out, pin-1);
- на главной панели программного модуля LC_2012S, в закладке [Analog Instruments] выбрать управляемый источник постоянного напряжения DC_ U_a , активировать и установить диапазон выходного напряжения $U_a = 0 \dots 10 \text{ В}$;
- задать номинал базового резистора $R_b = 5,1 \text{ кОм} = R11$;
- для контроля напряжения входной цепи транзистора U_{BE} подключить виртуальный монитор M7 (разъём DB-9 Analog_In, pin-1). На главной панели программного модуля LC_2012S выбрать закладку [Multimeter] и активировать монитор M7;

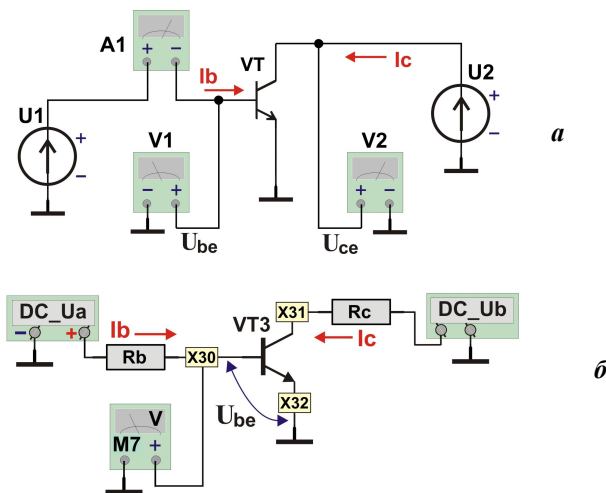


Рис. 4.4. Схемы для снятия входных статических характеристик транзистора по схеме ОЕ

• в качестве источника напряжения в выходной цепи коллектора, использовать источник DC_U_b (разъём DB-9 Analog_Out, pin-2). Аналогично, в закладке [Analog_Instruments] выбрать управляемый источник постоянного напряжения DC_U_b и активировать его;

• задать номинал ограничительного резистора в цепи коллектора $R_c = 100 \text{ Ом} = R2$;

• с главной панели программного модуля LC_2012S в закладке [Devices]/[EMST_Analog] запустить управляющую программу для исследования транзистора [Bipolar Transistor Static Characteristics OE];

• в закладке [Functions] выбрать $I_b = f(U_{be})$, $U_{ce} = \text{const}$;

• в закладке [Regime] установить [Active];

• в закладке [Options] установить [Tpm] и задать рекомендуемое время измерения одной точки 900 мс;

• в закладке [Options] задать [Scale] / $I_{b \text{ max}} = 500 \text{ мкА}$;

• ввести номиналы используемых резисторов R_b, R_c в соответствующих окнах ввода.

После запуска измерений по кнопке [StartGraph] выполнить циклический замер двух зависимостей $I_b = f(U_{be})$, $U_{ce} = 0 \text{ В}$ и $U_{ce} = 5 \text{ В}$ (по 20 точек для каждой). Результат сформировать в графическом и табличном виде (рис. 4.5), а также сохранить в формате *.jpg в дополнительно созданной папке проекта [Transistor_Static Characteristics_JPG_Files].

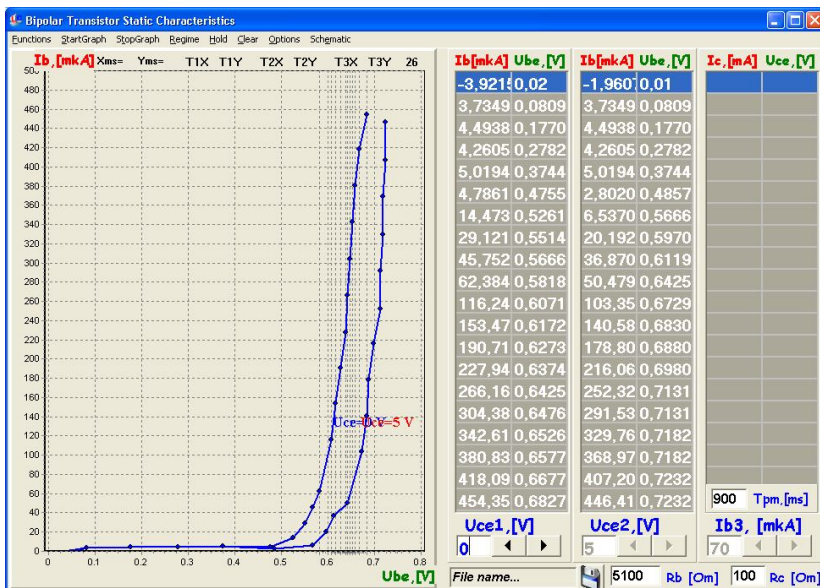


Рис. 4.5. Результат практических измерений входных статических характеристик транзистора в схеме с ОЕ

4.2. Снять выходные статические характеристики транзистора $I_C = f(U_{CE})$, при $I_B = \text{const}$ по схеме ОЕ:

- подключить модуль EMST_Analog к комплексу LC_2012S;
- собрать схему согласно рис. 4.6,б;

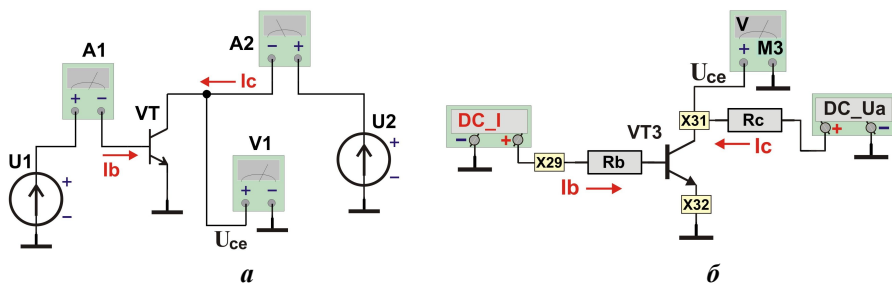


Рис. 4.6. Схемы для снятия выходных статических характеристик транзистора по схеме ОЕ

- выбрать тип исследуемого транзистора $VT3$ (BC337, NPN);
- в качестве входного источника тока (в цепи базы) использовать источник DC_I разъём DB-9 Analog_Out, DCI+ [pin-6], DCI- [pin-7];
- на главной панели программного модуля LC_2012S, в закладке [Analog Instruments] выбрать управляемый источник постоянного тока DC_I и активировать его;
- базовый резистор уже установлен в схеме с номиналом $R_b = 1000 \text{ Ом}$;
- для контроля напряжения выходной цепи транзистора U_{CE} подключить виртуальный монитор $M3$ (разъём DB-9 Analog_In, pin-4). На главной панели программного модуля LC_2012S выбрать закладку [Multimeter] и активировать монитор $M3$;
- в качестве источника напряжения в выходной цепи коллектора использовать источник DC_Ua (разъём DB-9 Analog_Out, pin-1). Аналогично, в закладке [Analog Instruments] выбрать управляемый источник постоянного напряжения DC_Ua и активировать его, установив диапазон $0 \dots 10 \text{ В}$;
- задать номинал ограничительного резистора в цепи коллектора $R_c = 51 \dots 100 \text{ Ом}$;
- с главной панели программного модуля LC_2012S в закладке [Devices]/[EMST_Analog] запустить управляющую программу для исследования транзистора [Bipolar Transistor Static Characteristics OE];
- в закладке [Functions] выбрать $I_C = f(U_{ce})$, $I_b = \text{const}$;
- в закладке [Regime] выбрать [Active];

- в закладке [Options] выбрать [Trm] и установить рекомендуемое время измерения одной точки 700 мс;
- в закладке [Options] выбрать [Scale] / $[I_{c_max}] = 50$ мА или 100 мА (в зависимости от входных токов);
- ввести номиналы используемых резисторов R_b , R_c в соответствующих окнах ввода;
- выбрать [Clear], после чего разрешается вводить заданные по вариантам значения токов базы I_{b1} , I_{b2} , I_{b3} ;

После запуска измерений по кнопке [StartGraph] выполняется циклический замер трёх зависимостей $I_c = f(U_{ce})$, для I_{b1} , I_{b2} , I_{b3} (по 20 точек для каждой). Результат сформировать в графическом и табличном виде (рис. 4.7), а также сохранить в формате *.jpg в дополнительно созданной папке проекта [Transistor_Static Characteristics_JPG_Files].

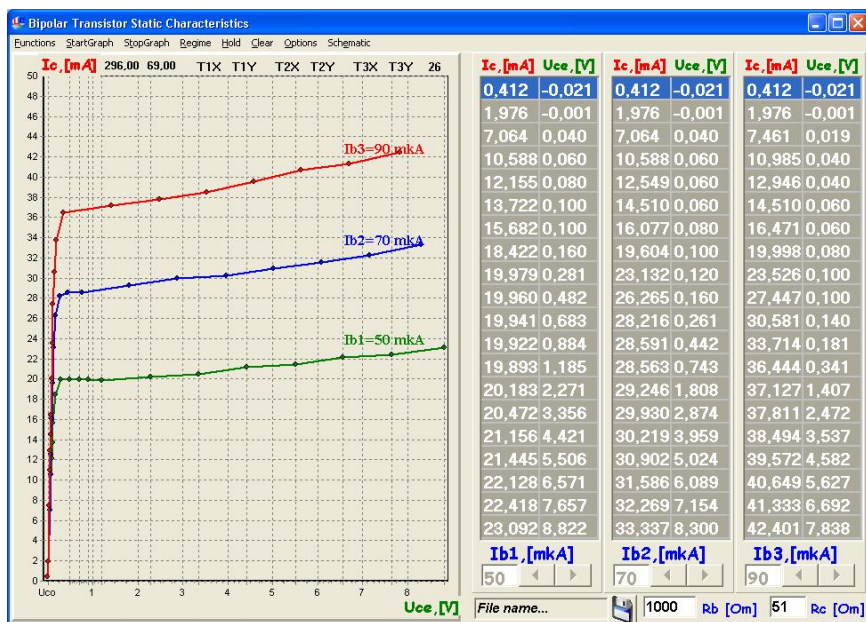


Рис. 4.7. Результат практических измерений выходных статических характеристик транзистора в схеме с ОЕ

4.3. Подготовить к защите отчёт:

- знать принцип работы биполярного транзистора, основные схемы включения, h -параметры;

- знать схемы для исследования входных и выходных статических ВАХ транзистора, а также принцип измерения тока I_b и I_c для схем, приведенных на рис. 4.4,б и рис. 4.6,б, на базе комплекса LC_2012S;
- по входным и выходным характеристикам графическим способом определить h -параметры в указанной рабочей точке;
- используя техническую документацию, перечислить и свести в таблицу основные электрические параметры по указанному преподавателем типу транзистора;
- написать выводы по результатам проделанной работы.

Лабораторная работа № 5

КОМПЕНСАЦИОННЫЙ СТАБИЛИЗАТОР НАПЯЖЕНИЯ

Цель работы: изучить схемотехнику построения компенсационных стабилизаторов напряжения (КСН). На базе лабораторного комплекса LC_2012S собрать и исследовать различные схемы КСН.

Теоретические сведения

Компенсационный стабилизатор напряжения. Силовая цепь стабилизатора (рис. 5.1) представляет собой регулирующий элемент (транзистор VT1) и нагрузку (R_L). За счет изменения падения напряжения на РЭ (т.е. значения $U_{CE(VT1)}$), поддерживается постоянство напряжения на нагрузке U_{RL} . Выходное напряжение стабилизатора определяется выражением

$$U_{RL} = U_{REF} + U_{CE(VT2)} - U_{BE(VT1)} . \quad (5.1)$$

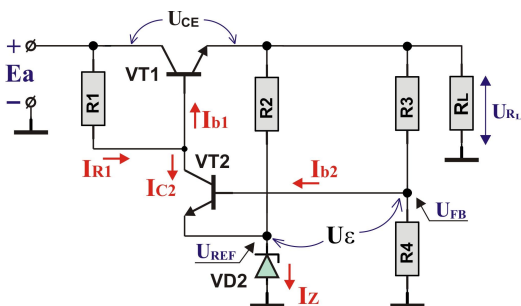


Рис. 5.1. Принципиальная схема КСН с последовательным регулирующим элементом

Цепь отрицательной обратной связи по напряжению (ООС) включает в себя: делитель напряжения ($R3, R4$), усилитель постоянного тока (транзистор VT2) и источник эталонного напряжения U_{REF} (reference voltage), рассмотренный нами ранее параметрический стабилизатор на элементах $R2, VD2$.

Напряжение обратной связи (U_{FB} – feedback voltage) снимается с нижнего плеча делителя напряжения ($R4$) и подается на вход УПТ (базу транзистора VT2), где происходит сравнение U_{FB} и U_{REF} . В УПТ усиливается разностное напряжение, сигнал ошибки

$$U_{\varepsilon} = U_{\text{FB}} - U_{\text{REF}}, \quad (5.2)$$

что приводит к изменению тока управления РЭ и изменению падения напряжения на РЭ (ΔU_{CE}). Напряжение на выходе (U_{RL}) при этом восстанавливается до своего первоначального значения.

Например, при возрастании напряжения (E_a) на входе или уменьшении тока нагрузки, происходит увеличение сигнала ошибки (U_{ε}), возрастает ток I_{b2} , что приводит к приоткрыванию транзистора VT2, уменьшению значения $U_{\text{CE(VT2)}}$ и увеличению коллекторного тока I_{c2} .

По закону Кирхгофа для узла:

$$I_{b1} = I_{R1} - I_{c2}. \quad (5.3)$$

Следовательно, уменьшится базовый ток I_{b1} регулирующего транзистора VT1. Он прикрывается, увеличивая значение падения напряжения на участке коллектор-эмиттер $U_{\text{CE(VT1)}}$, что приводит к восстановлению напряжения на нагрузке.

Схема имеет более высокий КПД по сравнению со стабилизатором напряжения с параллельным РЭ. Недостатком схемы является отсутствие защиты РЭ при возможных перегрузках по току в нагрузке.

Интегральный линейный стабилизатор напряжения. Интегральные линейные стабилизаторы напряжения (ЛСН) являются одними из важнейших элементов, с помощью которых строится распределенная система питания электронных устройств. Безусловными достоинствами использования интегральных линейных регуляторов (рис. 5.2)

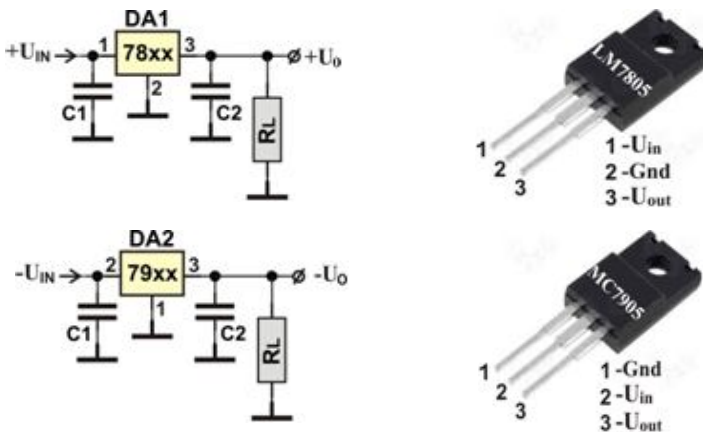


Рис. 5.2. Интегральные линейные стабилизаторы серий 78xx, 79xx

являются низкая стоимость, минимальные габариты компонентов и обвязки, а также отсутствие пульсаций выходного напряжения, что очень важно при питании прецизионной аналоговой техники. В ряде регуляторов обеспечивается безопасность функционирования, т.е. защита от перегрузки по току и температурная защита от перегрева микросхемы.

Стандартные интегральные ЛСН выпускаются многими производителями и имеют обозначение – 78xx (также известная как LM78xx), серия ИМС линейных стабилизаторов с фиксированным выходным напряжением. Большая популярность связана с требованием многих схем использовать стабилизированный источник питания, с их простотой использования и относительной дешевизной. При указании определённых микросхем серии, [xx] заменяется на двухзначный номер, обозначающий выходное напряжение стабилизатора (например, микросхема 7805 имеет выходное напряжение 5 В, а 7812 – 12 В). Стабилизаторы 78-ой серии имеют положительное выходное напряжение (относительно общего провода, земли). Существует серия стабилизаторов отрицательного напряжения 79xx, имеющая аналогичную систему обозначений. При необходимости, можно использовать их комбинацию для обеспечения и положительного, и отрицательного напряжений в одной схеме.

Также стабилизаторы подразделяются на слаботочные с выходным током 0,1 А (78Lxx), и средним значением тока 1...1,5 А (78xx).

Основным недостатком линейных стабилизаторов средней и большой мощности является их низкий КПД. Причем, чем меньше выходное напряжение источника питания, тем меньше становится его КПД. Это объясняется тем, что в режиме стабилизации силовой транзистор источника питания обычно включен последовательно с нагрузкой, а для нормальной работы такого стабилизатора на регулирующем транзисторе должно действовать напряжение коллектор-эмиттер (U_{CE}) не менее 3...5 В. При токах нагрузки более 1 А, это дает значительные потери мощности за счет выделения тепловой энергии, рассеиваемой на силовом транзисторе. Что приводит к необходимости увеличивать площадь теплоотводящего радиатора или применять вентилятор для принудительного охлаждения.

При недостатке места в конструкции и токах нагрузки более 1 А, целесообразно применять ЛСН серии "LOW DROP" (SD, DV, LT 1083/1084/1085). Эти микросхемы могут работать при пониженном напряжении между входом и выходом (до 1...1,3 В) и обеспечивают на выходе стабилизированное напряжение в диапазоне 1,25...30 В при токе в нагрузке 7,5/5/3 А соответственно.

Порядок выполнения работы

5.1. Исследовать КСН с регулирующим элементом на транзисторе без сигнала ОС (U_g):

- подключить модуль EMST_Analog к комплексу LC_2012S;
- собрать схему согласно рис. 5.3;

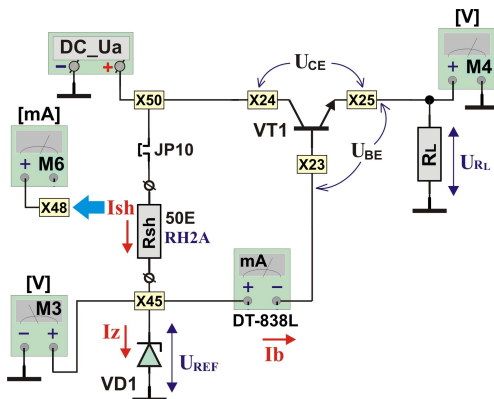


Рис. 5.3. Схема КСН с регулирующим элементом на транзисторе без сигнала ОС (U_g)

- выбрать тип исследуемого транзистора VT1 (BD911, NPN);
- выбрать тип исследуемого стабилитрона VD1 (Z1SMA5V6);
- в качестве входного источника напряжения использовать источник DC_ U_a (разъём DB-9 Analog_Out, pin-1);
- на главной панели программного модуля LC_2012S, в закладке [Analog Instruments] выбрать управляемый источник постоянного напряжения DC_ U_a , активировать и установить диапазон выходного напряжения $U_a = 0 \dots 10$ В;
- задать номинал нагрузочного резистора $R_L = 100 \text{ Ом} = R_2$;
- установить джампер JP10 (подключение шунта $R_{sh} = 50 \text{ Ом}$);
- установить джамперами JP9, JP13 коэф. усиления измерителя тока $K_u = 1$;
- для контроля тока I_{sh} подключить виртуальный монитор M6 (разъём DB-9 Analog_In, pin-7) к контакту X48;
- для контроля тока базы (I_b) регулирующего транзистора подключить цифровой мультиметр DT-838L между узлами X48 – X23 схемы;
- для контроля напряжения на стабилитроне (U_z) подключить виртуальный монитор M3 (разъём DB-9 Analog_In, pin-4);

- для контроля напряжения на нагрузке (U_{RL}) подключить виртуальный монитор M4 (разъём DB-9 Analog_In, pin-5);
- на главной панели программного модуля LC_2012S выбрать закладку [Multimeter] и активировать мониторы M3, M4. Для монитора M6 установить измерение тока с параметрами: $I_d = 0 \dots 100$ мА, $R_{sh} = 50$ Ом, $K_u = 1$;
- в процессе исследования значения входного источника задаются виртуальным слайдером DC_ U_a . Значения параметров E_a , U_{REF} , I_{SH} , I_b , U_{RL} зафиксировать в табл. 5.1;

Таблица 5.1

E_a , В	U_{REF} , В	I_{SH} , мА	I_b , мА	U_{RL} , В	U_{BE} , В
7,0					
8,0					
9,0					
10,0					

- после выполнения измерения установить значения источника $U_a = 0$ В;
- для расчёта напряжения на переходе база-эмиттер регулирующего транзистора VT1 использовать зависимость

$$U_{BE(VT1)} = U_{REF} - U_{RL}. \quad (5.4)$$

5.2. Исследовать КСН с усилителем сигнала ОС (U_g) на операционном усилителе:

- подключить модуль EMST_Analog к комплексу LC_2012S;
- собрать схему согласно рис. 5.4;
- задать тип исследуемого транзистора VT1 (BD911, NPN);

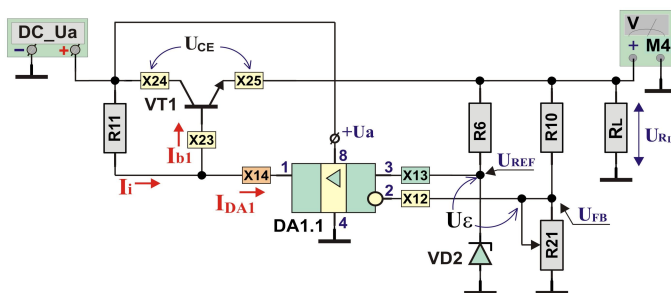


Рис. 5.4. Схема исследования КСН на операционном усилителе

- задать тип исследуемого стабилитрона VD2 (BZV55-3V3);
- в качестве входного источника напряжения использовать источник DC_ U_a (разъём DB-9 Analog_Out, pin-1);
- на главной панели программного модуля LC_2012S, в закладке [Analog Instruments] выбрать управляемый источник постоянного напряжения DC_ U_a , активировать и установить диапазон выходного напряжения $U_a = 0 \dots 10$ В;
- задать номинал нагрузочного резистора $R_L = 51$ Ом = R1;
- для контроля напряжения на нагрузке (URL) подключить виртуальный монитор M4 (разъём DB-9 Analog_In, pin-5);
- на главной панели программного модуля LC_2012S выбрать закладку [Multimeter] и активировать монитор M4;
- подключить однополярное питание операционного усилителя DA1 согласно рис. 5.5. При этом, джампер JP1 перевести в положение 3-2 (DA1 вывод 4 – Gnd). Джампер JP2 – разомкнут (отключено питание DA1, вывод 8 от общей шины +5 В). Вывод джампера JP2.2 подключить к источнику DC_ U_a ;
- в процессе исследования КСН, значения входного источника задать виртуальным слайдером DC_ U_a . Значения параметров U_a , U_{RL} зафиксировать в табл. 5.2;
- после выполнения измерения установить значения источника $U_a = 0$ В;

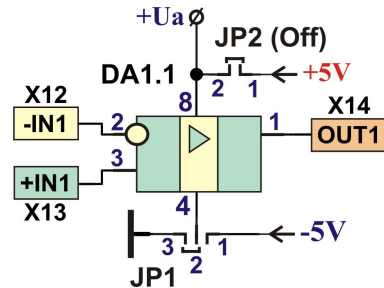


Рис. 5.5. Подключение питания ОУ DA1 в исследуемой схеме КСН

Таблица 5.2

U_a , В	U_{RL} , В
7,0	
8,0	
9,0	
10,0	

5.3. Исследовать линейный СН в интегральном исполнении серии 78xx:

- подключить модуль EMST_Analog к комплексу LC_2012S;
- собрать схему согласно рис. 5.6;
- задать тип исследуемого интегрального стабилизатора DA (LM7805);
- в качестве входного источника напряжения использовать источник DC_ U_a (разъём DB-9 Analog_Out, pin-1);
- на главной панели программного модуля LC_2012S, в закладке [Analog Instruments] выбрать управляемый источник постоянного

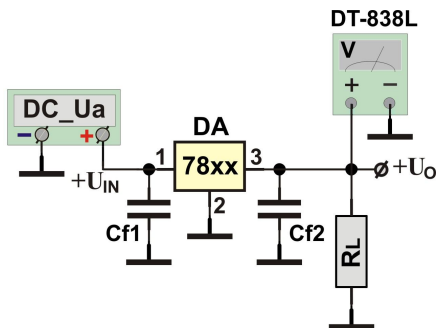


Рис. 5.6. Схема исследования интегрального ЛСН 78xx

ров U_{IN} , U_O зафиксировать в табл. 5.3;

Таблица 5.3

U_{IN} , В	U_O , В
7,0	
8,0	
9,0	
10,0	

• после выполнения измерения установить значения источника $U_a = 0$ В.

5.5. Подготовить к защите отчёт:

- знать принцип работы рассмотренных схем компенсационных стабилизаторов (рис. 5.1, рис. 5.4, рис. 5.5);
- заполнить таблицы 5.2–5.4;
- рассчитать коэффициенты стабилизации (K_s) для исследованных схем КСН (рис. 5.4, рис. 5.6, рис. 5.9), используя зависимость 5.5;
- сравнить полученные коэффициенты стабилизации (K_s) и сделать выводы по рассмотренным схемам;
- сделать общие выводы по результатам проделанной работы.

напряжения DC_U_a , активировать и установить диапазон выходного напряжения $U_a = 0 \dots 10$ В;

• задать номинал нагрузочного резистора $R_L = 51 \text{ Ом} = R1$;

• для контроля напряжения на нагрузке (U_O) подключить электронный мультиметр DT-838L;

• в процессе исследования стабилизатора, значения входного источника задать виртуальным слайдером DC_U_a . Значения парамет-

Лабораторная работа № 6

БИПОЛЯРНЫЙ ТРАНЗИСТОР В КЛЮЧЕВОМ РЕЖИМЕ РАБОТЫ

Цель работы: изучить принципы построения и расчёта схем ключей на биполярных транзисторах. На базе лабораторного комплекса LC_2012S произвести исследование схем электронных ключей.

Теоретические сведения

Ключевой режим биполярного транзистора. Технические реализации цифровых схем, в которых сигналы представлены дискретно квантованными уровнями напряжения (тока), основаны на использовании электронных коммутаторов напряжения (тока), называемых электронными ключами. В качестве нелинейных приборов с управляемым сопротивлением в электронных ключах используются биполярные и полевые транзисторы, фототранзисторы, тиристоры, оптроны, электронные лампы. Следует отметить, что электронные ключи, чаще всего, являются однонаправленными, т.е. коммутируют ток и напряжение одного знака.

Транзисторный ключ (ТК) – устройство, обеспечивающее переключение тока в нагрузке при подаче на базу транзистора управляющего напряжения определенной полярности и уровня.

Наиболее распространённая схема транзисторного ключа (с ОЕ) приведена на рис. 6.1. Особенность данной схемы изменять фазу выходного сигнала (на нагрузке), относительно входного на 180° .

Ключевой режим работы транзистора характеризуется двумя чередующимися областями (рис. 6.2), в которых транзистор может находиться либо в открытом состоянии – область 1 (насыщение, эквивалент замкнутого ключа, наличие максимального тока в нагрузке), либо в закрытом состоянии – область 2 (отсечка, эквивалент разомкнутого ключа, отсутствие тока в нагрузке).

Качество работы электронного ключа определяется скоростью работы, то есть временем перехода из одного состояния в другое, т.е., когда рабочая точка перемещается из точки А в точку D, и обратно.

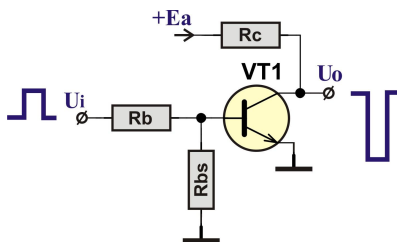


Рис. 6.1. Транзисторный ключ на биполярном транзисторе по схеме с ОЕ

Необходимо учитывать, что в режиме насыщения переход база – коллектор (U_{bc}) и база – эмиттер (U_{be}) находятся в открытом состоянии, а в режиме отсечки – заперты.

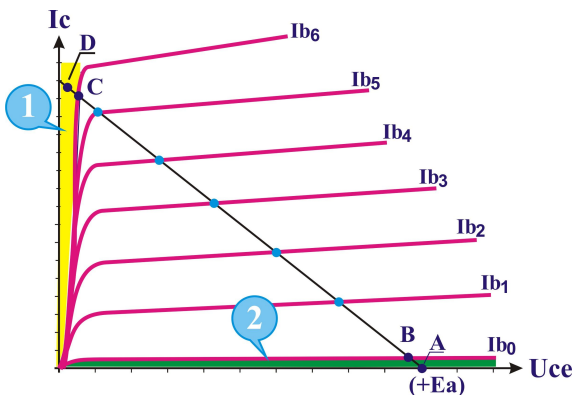


Рис. 6.2. Области, характеризующие ключевой режим БТ:
1 – насыщения; 2 – отсечки

Порядок выполнения работы

6.1. Провести исследование работы ключа на БТ:

- подключить модуль EMST_Analog к комплексу LC_2012S;
- собрать схему согласно рис. 6.3;

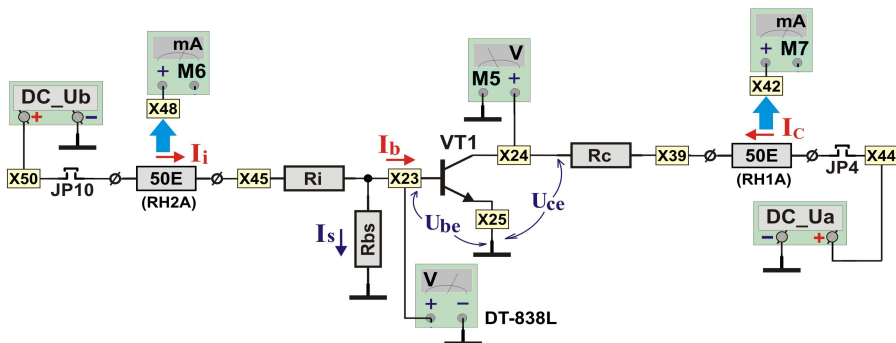


Рис. 6.3. Схема исследования ключа на биполярном транзисторе
в статическом режиме

- задать тип исследуемого транзистора VT1 (BD911, NPN);
- задать расчётный номинал резистора $R_i = R10 + R5 = 1000 + 300 = 1300 \text{ Ом}$;

- задать эквивалент базового резистора $R_b = R_1 + RH2A = 1300 + 50 = 1350 \text{ Ом}$;
- задать эквивалент нагрузочного резистора $R_L = R_c + RH1A = 100 + 50 = 150 \text{ Ом}$;
- выбрать резистор смещения $R_{bs} = R14 = 10 \text{ кОм}$;
- в качестве источника питания нагрузки (цепи коллектора), использовать источник DC_U_a (разъём DB-9 Analog_Out, pin-1). В закладке [Analog Instruments] выбрать управляемый источник постоянного напряжения DC_U_a и активировать его, установив диапазон $0 \dots 10 \text{ В}$;
- в качестве источника входного напряжения (базовой цепи), использовать источник DC_U_b (разъём DB-9 Analog_Out, pin-2). Аналогично, в закладке [Analog Instruments] выбрать управляемый источник постоянного напряжения DC_U_b и активировать его;
- установить джампер JP10 (подключение шунта $R_{sh} = RH2A = 50 \text{ Ом}$);
- установить джамперами JP9, JP13 коэф. усиления измерителя тока $K_u = 10$;
- для контроля тока базы I_b подключить виртуальный монитор M6 (разъём DB-9 Analog_In, pin-7) к контакту X48;
- установить джампер JP4 (подключение шунта $R_{sh} = RH1A = 50 \text{ Ом}$);
- установить джамперами JP7, JP3 коэффициент усиления измерителя тока $K_u = 1$;
- для контроля коллекторного тока I_c подключить виртуальный монитор M7 (разъём DB-9 Analog_In, pin-8) к контакту X42;
- для контроля напряжения на коллекторе U_{ce} подключить виртуальный монитор M5 (разъём DB-9 Analog_In, pin-6);
- на главной панели программного модуля LC_2012S выбрать закладку [Multimeter] и активировать: монитор M5, монитор M6 на измерение тока с параметрами: $I_d = 0 \dots 10 \text{ мА}$, $R_{sh} = 50 \text{ Ом}$, $K_u = 10$, монитор M7 на измерение тока с параметрами: $I_d = 0 \dots 100 \text{ мА}$, $R_{sh} = 50 \text{ Ом}$, $K_u = 1$;
- для уменьшения колебаний тока нагрузки в статическом режиме, подключить демпфирующую ёмкость $C_{BE} = 4,7 \dots 10 \text{ мкФ}$ между выводами "база" и "эмиттер" исследуемого транзистора VT1;
- установить значение источника питания цепи нагрузки $DC_U_a = 10 \text{ В}$;
- в процессе исследования, задать значения входного сигнала U_s с помощью источника DC_U_b , согласно рекомендованным значениям

тока нагрузки I_C коллекторной цепи. Значения параметров U_b, I_b, I_C, U_{ce} зафиксировать в табл. 6.1.

Таблица 6.1

№	DC U_a , В	DC U_b , В	U_{be} , В	I_b , мкА	I_C , мА	U_{CE} , В
1	10	0,0				
2	10	0,2				
3	10	0,4				
4	10	0,5				
5	10	0,55				
6	10	0,6				
7	10	0,65				
8	10	0,7				
9	10	0,75				
10	10	0,8				
11	10	0,9				
12	10	1,0				
13	10	2,0				
14	10	3,0				
15	10	5,0				

Таким образом, перемещаясь по нагрузочной прямой (рис. 6.2) из точки А в точку D, транзисторный ключ переходит из состояния отсечки (область 2) в состояние насыщения (область 1);

- после выполнения измерения установить значения источников $U_a = 0, U_b = 0$ В;
- для контроля исследуемого ключа в динамике, необходимо извешнить входную часть схемы, как показано на рис. 6.4. В данном случае, ТК будет управляться сигналом U_s TTL-уровня с цифрового генератора;

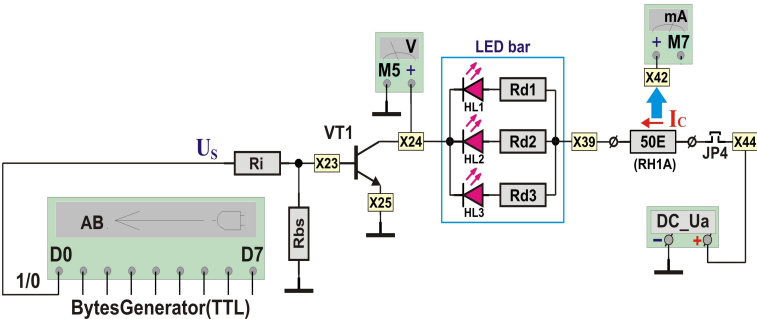


Рис. 6.4. Схема исследования транзисторного ключа, управляемого генератором

- на главной панели программного модуля LC_2012S выбрать закладку [Digital Instruments] / [Bytes Generator], и активировать его кнопкой [Enable Chip];

- подключить управляющий сигнал U_s с цифрового генератора (разъём DB-15 Digital_Out, pin-1) к базовому резистору R_i ;

- в окне /Edit/ задать последовательность кодов, согласно рис. 6.5;

- установить циклическую последовательность кодов [$\sqrt{\text{Cyclic}}$];

- установить задержку Delay = 2000 мс;

- запустить генератор [Move on Table];

- контролируя значения коллекторного тока I_c виртуальным монитором M7, и напряжение на коллекторе U_{ce} монитором M5, проанализировать периодическое перемещение рабочей точки ТК из области отсечки в область насыщения.

6.2. Подготовить к защите отчёт:

- заполнить табл. 6.1;

- охарактеризовать параметры точек A...D на нагрузочной прямой (рис. 6.2);

- показать соответствие точек A...D нагрузочной прямой с данными табл. 6.1;

- по данным табл. 6.1 определите параметры $U_{be(SAT)}$ и $U_{ce(SAT)}$ исследуемого транзистора при максимальном токе нагрузки;

- отобразить временные диаграммы работы транзисторного ключа (рис. 6.4) в точках U_s , $U_{b(X23)}$, $U_{c(X24)}$ схемы;

- знать основные электрические параметры транзистора;

- знать методы повышения быстродействия ключа на БТ;

- знать последовательность расчёта ключа на БТ;

- сделать общие выводы по результатам проделанной работы.

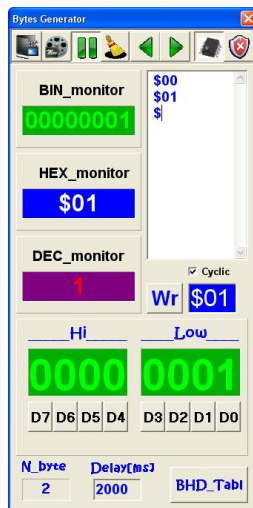


Рис. 6.5. Настройки панели инструмента [Bytes Generator]

Лабораторная работа № 7

ПОЛЕВОЙ ТРАНЗИСТОР В КЛЮЧЕВОМ РЕЖИМЕ РАБОТЫ

Цель работы: изучить принципы построения и расчёта схем ключей на полевых (МОП, МДП) транзисторах. На базе лабораторного комплекса LC_2012S произвести исследование схемы электронного ключа.

Теоретические сведения

Ключевой режим полевого транзистора. Полевым транзистором именуют такой компонент, через который под влиянием продольного электрического поля протекает ток, обусловленный движением носителей заряда одного типа. Область, толщина и поперечное сечение которой, управляется внешним напряжением, и по которой проходит управляемый ток основных носителей, называют *каналом*.

В зависимости от устройства канала проводимости различают полевые транзисторы со *встроенным* и *индуцированным* (наведенным) каналом. У транзисторов со встроенным каналом (рис. 7.1, *а, б*), канал является элементом конструкции, а у приборов с индуцированным каналом (рис. 7.1, *в, г*) – наводится внешним напряжением. Проводимость канала может быть N- и P-типа. Поэтому, по типу проводимости канала различают полевые транзисторы с N-каналом и P-каналом.

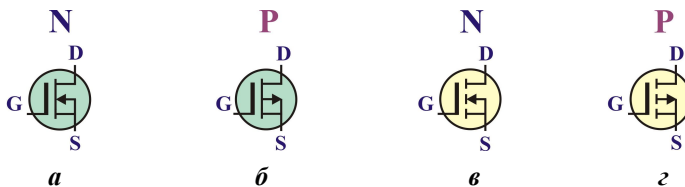


Рис. 7.1. MOSFET транзисторов с изолированным затвором, с встроенным и индуцированным каналами N и P типа

Из всего многообразия полевых транзисторов для построения электронных ключей наибольшее распространение получили транзисторы с изолированным затвором, имеющие индуцированный канал. Транзисторы этого типа характеризуются пороговым напряжением U_{th} (рис. 7.2, *а*), при котором возникает проводимость канала.

В соответствии со своей физической структурой, полевой транзистор с изолированным затвором носит название МОП-транзистор (Металл-Оксид-Полупроводник), или МДП-транзистор (Металл-Диэлектрик-

Полупроводник). Международное название прибора – MOSFET (Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor).

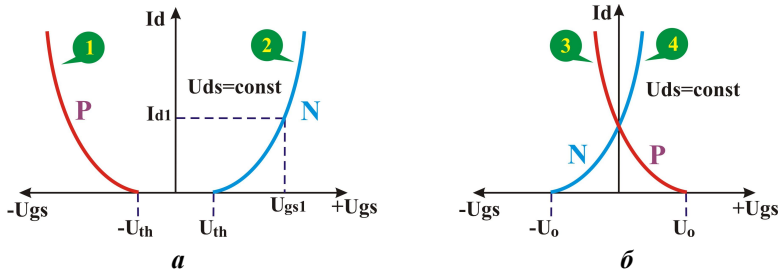


Рис. 7.2. Передаточные характеристики MOSFET транзисторов с различными видами каналов:
 a – индуцированным; $б$ – встроенным

Затвор (Gate) – вывод полевого транзистора, к которому подводят напряжение от устройства управления, для регулирования поперечного сечения канала. Следует подчеркнуть, что управление полевыми транзисторами осуществляют напряжением, а биполярными транзисторами – током.

Исток (Source) – электрод, который служит входом (источником поступления в транзистор) основных носителей заряда от устройства электропитания.

Сток (Drain) – электрод, через который из канала уходят (покидают транзистор) основные носители заряда.

Для этих приборов характерна взаимозаменяемость стока и истока, следовательно ток в канале может протекать в обоих направлениях, в зависимости от полярности напряжения, приложенного к каналу.

К важнейшим характеристикам полевых транзисторов относят стоко-затворную (передаточную) характеристику (рис. 7.2) и семейство стоковых характеристик (рис. 7.3). Стоко-затворная характеристика отражает зависимость силы тока стока I_D (в нагрузке), от приложенного управляющего напряжения к выводам затвор-исток (U_{gs}), при фиксированном напряжении питания сток-исток (U_{DS}).

Необходимо учитывать, что режим насыщения для МДП транзистора принципиально отличается от режима насыщения биполярного транзистора. Переходные процессы в ключах на полевых транзисторах обусловлены переносом носителей через канал и перезарядом междуэлектродных емкостей, емкостей нагрузки и монтажа.

В процессе включения транзистора, рабочая точка (в идеальном случае) должна пройти траекторию 1-2-3-4, достигнув значения тока нагрузки IRL. При выключении необходимо реализовать траекторию 4-5-1 (рис. 7.3).

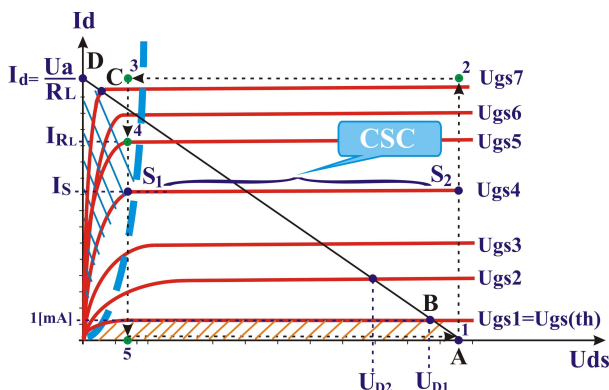


Рис. 7.3. Семейство стоковых характеристик $I_d = f(U_{ds})$, $U_{gs} = \text{const}$ транзистора MOSFET

Порядок выполнения работы

7.1. Провести исследование работы MOSFET ключа:

- подключить модуль EMST_Analog к комплексу LC_2012S;
- собрать схему согласно рис. 7.4;

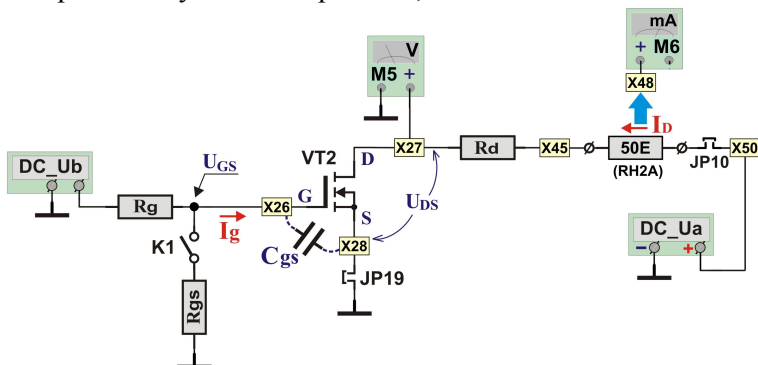


Рис. 7.4. Схема исследования MOSFET ключа

- выбрать тип исследуемого транзистора VT2 (IRF540, N-channel);
- задать $R_g = R_6 = 560 \text{ Ом}$, $R_d = R_1 = 51 \text{ Ом}$;
- задать эквивалент нагрузочного резистора $R_L = R_d + R_{sh} = 50 + 50 = 100 \text{ Ом}$;

- выбрать резистор смещения $R_{gs} = R14 = 10 \text{ Ом}$;
- в качестве источника питания нагрузки (цепи стока), использовать источник DC_U_a (разъём DB-9 Analog_Out, pin-1). В закладке [Analog Instrumets] выбрать управляемый источник постоянного напряжения DC_U_a и активировать его, установив диапазон $0 \dots 10 \text{ В}$;
- в качестве источника входного напряжения (цепи затвора), использовать источник DC_U_b (разъём DB-9 Analog_Out, pin-2). Аналогично, в закладке [Analog Instrumets] выбрать управляемый источник постоянного напряжения DC_U_b и активировать его;
- установить джампер JP19 (подключение истока VT2 к общему проводу источника питания);
- установить джампер JP10 (подключение шунта $R_{sh} = RH2A = 50 \text{ Ом}$);
- установить джамперами JP9, JP13 коэф. усиления измерителя тока $K_u = 1$;
- для контроля тока стока I_d подключить виртуальный монитор M6 (разъём DB-9 Analog_In, pin-7) к контакту X48;
- для контроля напряжения сток-исток U_{ds} подключить виртуальный монитор M5 (разъём DB-9 Analog_In, pin-6);
- на главной панели программного модуля LC_2012S выбрать закладку [Multimeter] и активировать: монитор M5, монитор M6 на измерение тока с параметрами: $I_d = 0 \dots 100 \text{ мА}$, $R_{sh} = 50 \text{ Ом}$, $K_u = 1$;
- для уменьшения колебаний тока нагрузки в статическом режиме, подключить демпфирующую ёмкость $C_{GS} = 4,7 \dots 10 \text{ мкФ}$ между выводами "Gate" и "Source" исследуемого транзистора VT2;
- установить значение источника питания цепи нагрузки $DC_U_a = 10 \text{ В}$;
- в процессе исследования, задавать значения входного сигнала U_{gs} с помощью источника DC_U_b , согласно рекомендованным значениям I_d^{gs} , U_{gs} . Значения параметров U_{gs} , I_d , U_{DS} зафиксировать в табл. 7.1. Таким образом, перемещаясь по нагрузочной прямой (рис. 7.3) из точки А в точку D, транзисторный ключ переходит из области отсечки в область насыщения;
- после выполнения измерения установить значения источников $U_a = 0 \text{ В}$, $U_b = 0 \text{ В}$.

Следующий опыт позволяет практически исследовать участок S_1-S_2 на выходных характеристиках (рис. 7.3), характеризующий насыщение канала током (область CSC – channel saturation by current).

Таблица 7.1

№	DC U_a , В	U_{GS} , В	I_D , мА	U_{DS} , В
1	10	0,0		
2	10	1,0		
3	10	2,0		
4	10	3,0		
5	10	3,2		
6	10	3,4		
7	10	3,6		
8	10	3,7		
9	10	3,8		
10	10	3,9		
11	10	4,0		
12	10	4,1		
13	10	4,5		
14	10	5,0		

Для эксперимента выбирается участок характеристики, соответствующий среднему току нагрузки $I_D = 40 \dots 60$ мА, при заданном значении управляющего напряжения на затворе U_{GS} (табл. 7.2). На данном участке, при изменении напряжения цепи питания нагрузки U_{DS} , ток в нагрузке остаётся неизменным $I_D = \text{const}$, при фиксированном значении управляющего напряжения на затворе $U_{GS} = \text{const}$.

Таблица 7.2

№	DC U_a , В	U_{GS} , В	I_D , мА	U_{DS} , В
1	10			
2	9			
3	8			
4	7			
5	6			
6	5			

Для исследования MOSFET-ключа в динамике, приводится практический пример простого драйвера (рис. 7.5) управления униполярным шаговым двигателем типа ПБМГ-200-365. Активное сопротивление обмотки $R_L = 62$ Ом.

Униполярный двигатель (SM) имеет две обмотки АВ и CD, причём от середины каждой обмотки сделаны отводы (А'В') и (С'D'). Это позволяет изменять направление магнитного поля, создаваемого обмоткой, соответствующей коммутацией её половины. При этом, существенно упрощается схема драйвера, в составе силовой части которого уста-

новлены 4 MOSFET-ключа (транзисторы VT3...VT6) с параметрами:
 Транзисторы VT3-VT6 MOSFET STN4NF03L;
 $U_{GS(th)} = 1 \text{ В}$ (Low threshold drive);
 $R_{DS(ON)} = 0,039 \text{ Ом}$; $U_{DS} = 30 \text{ В}$; $I_D = 6,5 \text{ А}$.

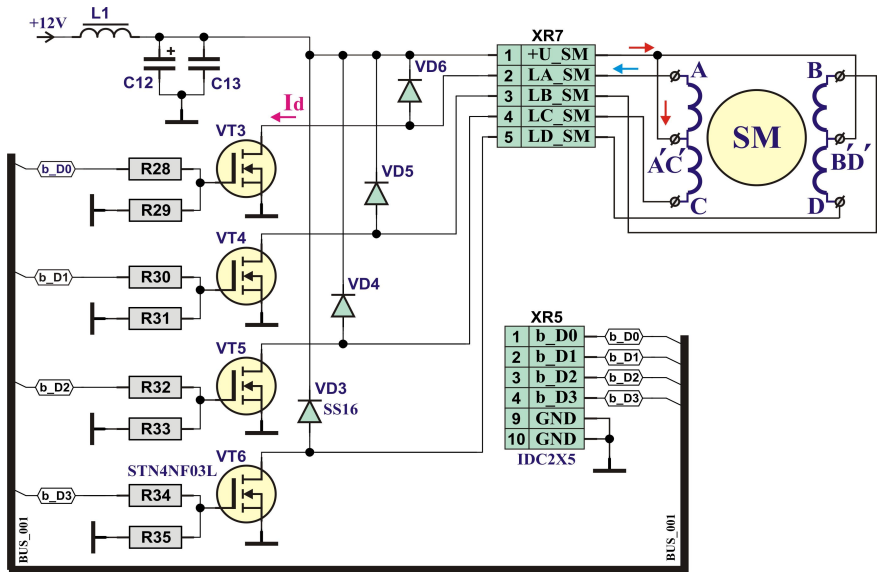


Рис. 7.5. Силовая часть схемы управления униполярным шаговым двигателем

Сигналы управления ключей $b_D0 \dots b_D3$ поступают от микроконтроллера через буферный регистр 74HC574 с 3-мя состояниями на внешний разъём XR5.

Применим один из способов формирования управляющей последовательности сигналов $b_D0 \dots b_D3$ – попеременную коммутацию фаз (табл. 7.3). При этом они не перекрываются, в один момент времени запитана (включена) только одна фаза (половина обмотки). Этот способ называют "one phase on" full step или wave drive mode.

Недостатком этого способа управления является то, что для биполярного двигателя в один и тот же момент времени используется 50 % обмоток, а для униполярного –

Таблица 7.3

N	b D3	b D2	b D1	b D0	HEX
1	0	0	0	1	\$01
2	0	0	1	0	\$02
3	0	1	0	0	\$04
4	1	0	0	0	\$08

только 25 %. Это означает, что в таком режиме не может быть получен полный момент.

Если установлена кодовая комбинация \$01 входных сигналов $b_D0 \dots b_D3$, то транзисторные ключи VT4...VT6 будут закрыты. Ток будет протекать по цепи: $XR7(+Psm) \rightarrow (A'B') \rightarrow (A) \rightarrow XR7(LA_SM) \rightarrow \rightarrow Drain(VT3) \rightarrow Source(VT3) \rightarrow GND$. Т.е., будет открыт только ключ VT3, обеспечивая протекание тока через верхнюю половину обмотки (AB).

Выполнить следующие действия:

- подключить модуль Sensors_Board к комплексу LC_2012S;
- подключить шаговый двигатель к разъёму XR7 модуля Sensors_Board;

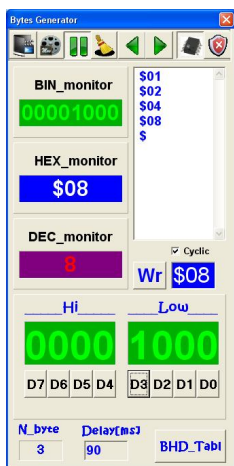


Рис. 7.6. Настройки панели инструмента [Bytes Generator]

- подключить управляющие сигналы $b_D0 \dots b_D3$ с цифрового генератора (разъём DB-15 Digital_Out) к разъёму XR5 модуля Sensors_Board;

- на главной панели программного модуля LC_2012S выбрать закладку [Digital Instruments] / [Bytes Generator] и активировать цифровую шину кнопкой [Bus D0...D7 Enable] (рис. 7.6);

- на модуле [Bytes Generator] / [Options] установить защиту драйвера шагового двигателя [SM driver protection – On];

- в окне /Edit/ задать последовательность кодов, согласно табл. 7.3;

- установить циклическую последовательность кодов [$\sqrt{\text{Cyclic}}$];

- установите задержку Delay = 90 мс;

- запустите генератор [btn_Move on Table].

• после запуска генератора происходит вращение вала шагового двигателя по часовой стрелке. При этом происходит коммутация транзисторных ключей VT4...VT6 согласно управляющей последовательности сигналов $b_D0 \dots b_D3$ по табл.7.3;

- остановить генератор [btn_Pause];

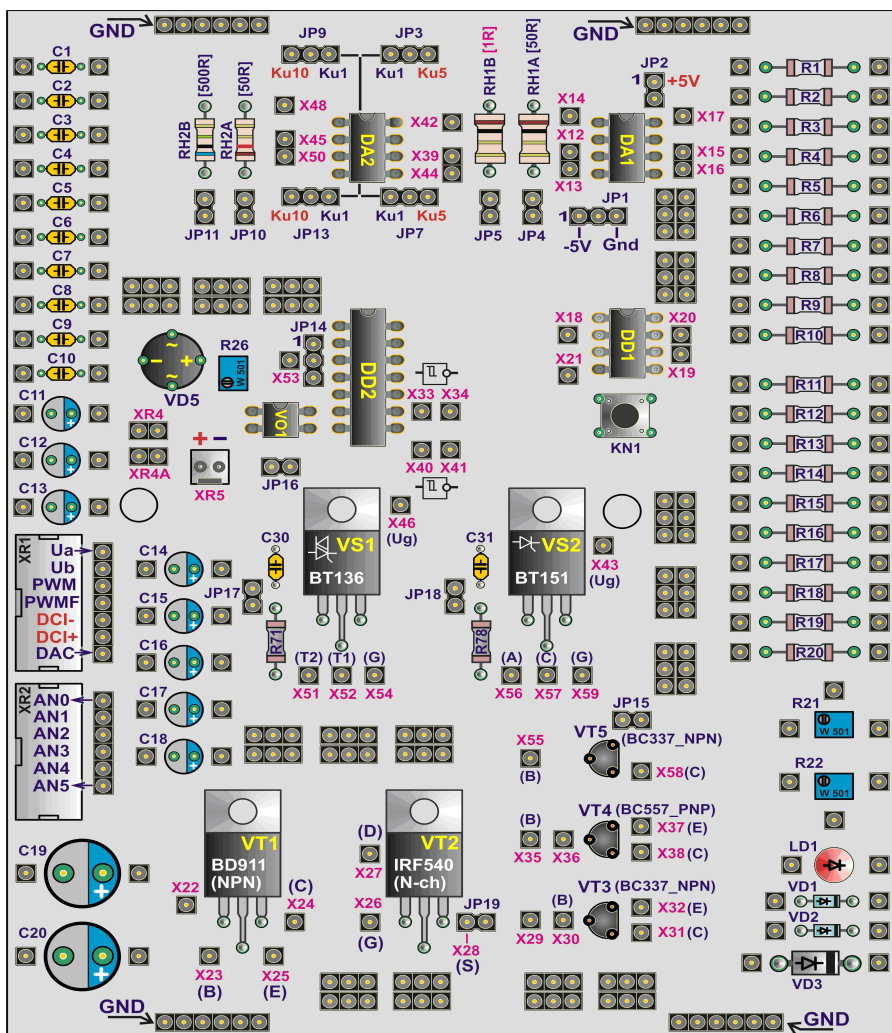
• в окне /Edit/ изменить последовательность кодов, чтобы обеспечить вращение вала двигателя против часовой стрелки и запустить генератор [btn_Move on Table].

7.2 . Подготовить к защите отчёт:

- знать требования к управлению затвором MOSFET и способы реализации;
- заполнить табл. 7.1, табл. 7.2;
- используя данные табл.7.1, построить стоко-затворную (передаточную) характеристику $I_d = f(U_{gs})$ при $U_{ds} = \text{const}$ исследованного MOSFET-транзистора VT2 (IRF540);
- используя данные табл. 7.2, построить участок стоковой характеристики $I_d = f(U_{ds})$ при $U_{gs} = \text{const}$ исследованного MOSFET-транзистора VT2;
- охарактеризовать параметры точек А...D на нагрузочной прямой (рис. 7.3) по данным табл. 7.1;
- отобразить временные диаграммы управляющих сигналов b_D0...b_D3 транзисторных ключей VT3...VT6 (рис. 7.5) для способа "one phase on" full step (для вращения...);
- отобразить временные диаграммы управляющих сигналов b_D0...b_D3 транзисторных ключей VT3...VT6 (рис. 7.5) для способа "two-phase-on" full step, управление фазами с перекрытием: две фазы включены в одно и то же время;
- аналогично табл.7.3, заполнить таблицу последовательности кодов управления b_D0...b_D3 ключами VT3...VT6 (рис. 7.5) для способа "two-phase-on" full step;
- сделать общие выводы по результатам проделанной работы.

Приложение 1

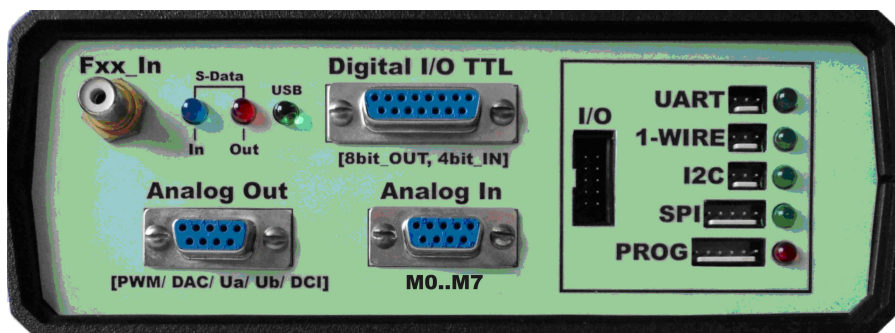
Монтажный чертёж платы лабораторного модуля EMST_Analog комплекса LC_2012S



Приложение_1 может быть вызвано с главной панели программного модуля LC_2012S в закладке [Devices]/[EMST_Analog]/[Analog Board_PCB].

Приложение 2

Панель модуля LC_2012S_MCU



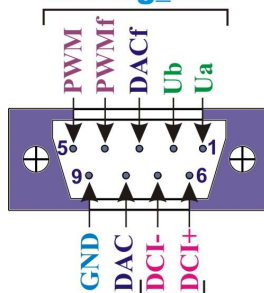
Разъём [Analog_OUT] предназначен для вывода программируемых:

- 1) источников напряжения $DC_U_a = 0..10\text{ В}$, $DC_U_b = -9..+9\text{ В}$;
- 2) источника тока [DC_I] с диапазонами: 1000 мкА, 2000 мкА, 20 мкА, 50 мкА, 100 мкА;
- 3) ШИМ-модулированного сигнала;
- 4) цифроаналогового преобразователя DAC 10 bit.

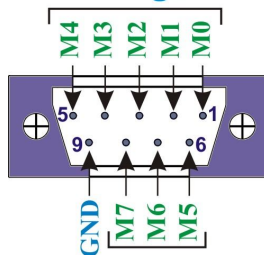
Разъём [Analog_In] предназначен для ввода аналоговых сигналов по 8-и каналам в диапазонах:

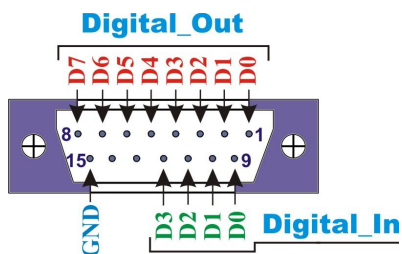
- AiN0(M0) $U_{in} = -5..+5\text{ В}$,
- AiN1(M1) $U_{in} = -5..+5\text{ В}$,
- AiN2(M2) $U_{in} = -5..+5\text{ В}$,
- AiN3(M3) $U_{in} = -10..+10\text{ В}$,
- AiN4(M4) $U_{in} = -10..+10\text{ В}$,
- AiN5(M5) $U_{in} = -10..+10\text{ В}$.
- AiN6(M6) $U_{in} = 0..+5\text{ В}$.
- AiN7(M7) $U_{in} = 0..+5\text{ В}$.

Analog_Out



Analog_In



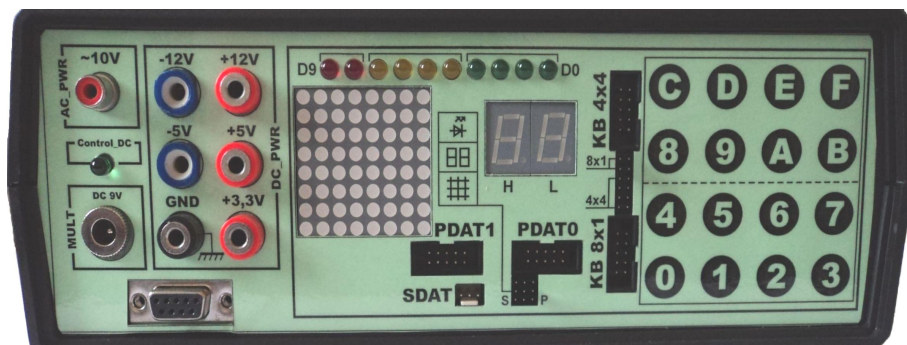


Разъём [DIGITAL IN/OUT TTL] предназначен для вывода сигналов TTL-уровня, биты D7...D0, и ввода сигналов TTL-уровня биты D3...D0.

Приложение_2 может быть вызвано с главной панели программного модуля LC_2012S в закладке [Info]/[LC_2012SMCUpanel].

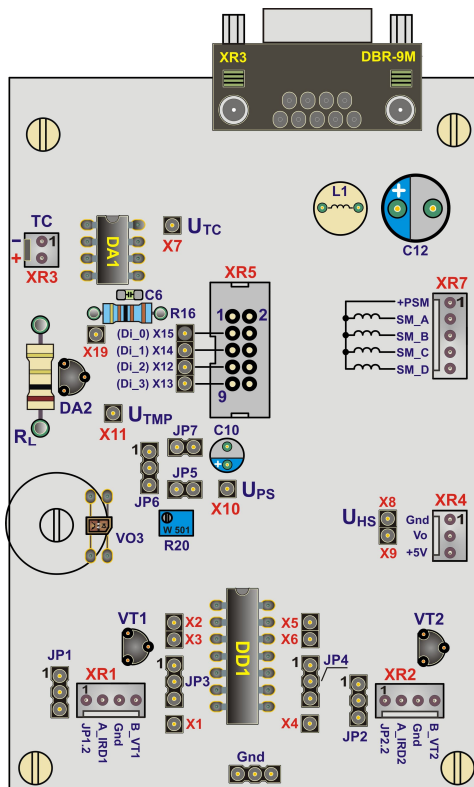
Приложение 3

Панель модуля LC_2012S_PWR



Приложение_3 может быть вызвано с главной панели программного модуля LC_2012S в закладке [Info]/ [LC_2012S PWR panel].

Приложение 4 Монтажный чертёж платы лабораторного модуля Sensors_Board комплекса LC_2012S



Приложение_4 может быть вызвано с главной панели программного модуля LC_2012S в закладке [Devices]/[IIS]/[Sensors Board_PCB].

Приложение 5

Номенклатура радиоэлементов лабораторного модуля EMST_Analog комплекса LC_2012S

Резисторы:

R1	R2	R3	R4	R5	R6	R7	R8	R9	R10
51 Ом	100 Ом	100 Ом	300 Ом	300 Ом	560 Ом	560 Ом	750 Ом	1 кОм	1 кОм

R11	R12	R13	R14	R15	R16	R17	R18	R19	R20
5,1 кОм	5,1 кОм	10 кОм	10 кОм	43 кОм	43 кОм	100 кОм	100 кОм	510 кОм	1 МОм

Шунты измерительные: RH1A = 50 Ом, RH1B = 1 Ом,
RH2A = 50 Ом, RH2B = 500 Ом.

Резисторы подстроечные: R21 = 10 кОм, R22 = 100 кОм,
R26 = 5 кОм.

Конденсаторы неполярные:

C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	C10
1000 пФ	4700 пФ	10 нФ	47 нФ	100 нФ	150 нФ	150 нФ	220 нФ	330 нФ	470 нФ

Конденсаторы полярные:

C11	C12	C13	C14	C15	C16	C17	C18	C19	C20
1 мкФ	2,2 мкФ	4,7 мкФ	10 мкФ	22 мкФ	47 мкФ	100 мкФ	220 мкФ	470 мкФ	1000 мкФ

Другие элементы:

LD1 – светодиод, $I_{\max} = 30$ мА, $U_F = 1,8$ В.

VD1 – стабилитрон 5,6 В, Z1SMA5V6.

VD2 – стабилитрон 3,3 В, BZV55-3V3.

VD3 – диод выпрямительный 1N4007.

VD5 – мост диодный W10M.

VT1 – транзистор биполярный NPN, BD911.

VT2 – MOSFET транзистор N-канальный, IRF540 $U_{DS} = 100$ В; $I_D = 30$ А; $R_{DS} = 44$ мОм.

VT3 – транзистор биполярный NPN, BC337, $U_{CE0} = 45$ В; $I_C = 500$ мА.
 $h_{FE} = 100 \dots 600$; $U_{CEsat} = 700$ мВ (при $I_C = 500$ мА; $I_b = 50$ мА); $I_{bm} = 200$ мА.

VT4 – транзистор биполярный PNP, BC557, 45 В/ 100 мА.

VT5 – транзистор биполярный NPN, BC337.

DA1, DA2 – операционные усилители общего применения LM358.

DD1 – таймер интегральный NE555.

VO1 – оптрон транзисторный, К817Р.

VS1 – (TRIAC), симметричный триодный тиристор или симистор, BT136.

VS2 – (SCR), полупроводниковый управляемый клапан или тиристор, BT151.

Приложение_5 может быть вызвано с главной панели программного модуля LC_2012S в закладке [Devices]/ [EMST_Analog]/ [Analog Board_PCB]/
/Window/ List.

РЕКОМЕНДОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. **Титце, У.** Полупроводниковая схемотехника [Текст] : справочное руководство / У. Титце, К. Шенк. – М. : Мир, 1982.
2. **Колонтаевский, Ю. Ф.** Радиоэлектроника [Текст] / Ю. Ф. Колонтаевский. – М. : Высшая школа, 1988.
3. **Гусев, В. Г.** Электроника [Текст] : учебное пособие для приборостроительных специальностей вузов. – 2-е изд. / В. Г. Гусев, Ю. М. Гусев. – М. : "Высшая школа", 1991. – 622 с.
4. **Достал, И.** Операционные усилители [Текст] : [пер. с англ.] / И. Достал. – М. : Мир, 1982. – 512 с.
5. **Гершунский, Б. С.** Основы электроники и микроэлектроники [Текст] / Б. С. Гершунский. – К. : Вища школа, 1989.
6. **Иванов, В. И.** Полупроводниковые оптоэлектронные приборы [Текст] : справочник / В. И. Иванов, А. И. Аксёнов. – М. : ЭНЕРГО-АТОМИЗДАТ, 1988.
7. **Шило, В. Л.** Популярные цифровые микросхемы. Справочник. [Текст] / В. Л. Шило. – М. : МРБ "РАДИО И СВЯЗЬ", 1987.
8. **Погодин, Д. В.** Методические указания к лабораторной работе №420 (ЕВВ) по курсу "Электротехника и электроника" [Текст] / Д. В. Погодин. – Казань, 2002.
9. **Мелешин, В. И.** Транзисторная преобразовательная техника [Текст] / В. И. Мелешин. – М. : Техносфера, 2005.
10. **Кудрявцев, И. А.** Электронные ключи [Текст] : учебное пособие / И. А. Кудрявцев, В. Д. Фалкин. – Самара, 2002.
11. **Лысь, В.** Российский ОУ КМОП с архитектурой rail-to-rail [Текст] / В. Лысь, Ю. Попов // Компоненты и технологии. – 2003. – № 8.

СОДЕРЖАНИЕ

<i>Лабораторная работа № 1. P-N переход. Исследование полупроводникового диода</i>	3
<i>Лабораторная работа № 2. Исследование стабилитрона. Параметрический стабилизатор</i>	10
<i>Лабораторная работа № 3. Выпрямители. Сглаживающие фильтры</i>	16
<i>Лабораторная работа № 4. Биполярный транзистор. Статические характеристики транзистора</i>	24
<i>Лабораторная работа № 5. Компенсационный стабилизатор напряжения (КСН)</i>	34
<i>Приложение 1. Монтажный чертёж платы лабораторного модуля EMST_Analog комплекса LC_2012S</i>	54
<i>Приложение 2. Панель модуля LC_2012S_MCU</i>	55
<i>Приложение 3. Панель модуля LC_2012S_PWR</i>	57
<i>Приложение 4. Монтажный чертёж платы лабораторного модуля Sensors_Board комплекса LC_2012S</i>	58
<i>Приложение 5. Номенклатура радиоэлементов лабораторного модуля EMST_Analog комплекса LC_2012S</i>	59
<i>Рекомендованная литература</i>	61