



МИНОБРНАУКИ РОССИИ

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
Московский технологический университет
МИРЭА



УТВЕРЖДАЮ

Первый проректор

Д. Панков

В.Л.Панков

"2016

ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ПРОФЕССИОНАЛЬНАЯ ПРОГРАММА Методические рекомендации

"Методика преподавания основ электроники в школе"

МОСКВА 2016

Введение

Актуальность программы, ее педагогическая целесообразность

В современном мире существенную, если не основную значимость приобретают разнообразные электронные приборы и устройства. Практически ни одна сфера производственной, научной, коммуникационной и образовательной деятельности не обходится без тех или иных средств измерений, контроля, управления, вычисления, связи, информационного обеспечения, которые представляют собой сложнейшие электронные системы. Это не только разнообразные бытовые приборы, такие как радиоприёмник, телевизор или стиральная машина, но и конечно персональный компьютер с мобильным телефоном. Жизнь человека, независимо от ее профессиональной направленности, всегда связана с электронными приборами и устройствами.

Надо отметить, что скорость развития технологий в электронной промышленности сегодня впечатляет. Сложность и малогабаритность электронных устройств растет в геометрической прогрессии. Поэтому особенно актуально знакомить ребенка с электроникой уже на школьной скамье. Знаний, получаемых на уроках физики и информатики явно не достаточно для того чтобы школьник чувствовал себя уверенно в электронном мире.

В школьной программе отсутствует отдельный курс, посвященный электронике. Текущая программа предоставляет возможность заполнить данный пробел и сформировать у школьника умения и навыки по пониманию принципов работы электронных приборов, их устройству и взаимосвязи различных аналоговых и цифровых компонентов, конструированию и разработке простых электронных схем.

Отличительные особенности программы

Программа состоит из двух больших разделов – аналоговая и цифровая электроника. При изучении материала первого раздела происходит ознакомление с основными характеристиками электрических сигналов как носителей информации, методами измерения параметров электрических сигналов и основными способами их генерирования и преобразования. Подробно рассматриваются характеристики современной элементной базы электроники – пассивных компонентов (R , C , L), наиболее распространенных дискретных полупроводниковых приборов и ИС. Теоретический курс подкрепляется циклом из 5 практических работ, при выполнении которых происходят самостоятельные исследования несложных аналоговых электронных схем, расчет их параметров, измерение характеристик, анализ и обработку полученных результатов.

Раздел цифровой электроники естественным образом связан с алгеброй логики, с которой и начинается изучение этого раздела. При изучении алгебры логики учащиеся получают представление о методе формального описания высказываний, законах алгебры логики и физически реализуемых эквивалентах логических операций. Даётся понятие о позиционных системах счисления, кодировании числовой информации, основных приемах синтеза логических схем. Рассматривается схемотехника и параметры логических элементов современных семейств ИС и микроконтроллеров. Практические занятия по этому разделу включают в себя 5 работ, посвященных как ознакомлению с характеристиками типовых логических ИС, характеристик микроконтроллеров, так и самостоятельному синтезу логических схем с их последующей реализацией на макете на основе типовых ИС ЛЭ и исследованию характеристик и свойств разработанной схемы.

Цели и задачи программы

Предлагаемая дополнительная профессиональная программа ставит целью подготовку преподавателей, интересующихся внедрением в учебный

процесс инженерных дисциплин, к методике и ведению дисциплин, посвященных основам аналоговой и цифровой электроники.

Приобретение теоретических и практических знаний по дисциплине, должно помочь преподавателям не только обучить учащихся основам аналоговой и цифровой электроники, навыкам технического проектирования аналоговых и цифровых схем с использованием современных компьютерных технологий, но и обеспечить помочь каждому обучаемому в практической реализации его творческих замыслов, вплоть до их материальной реализации на базе центров технологической поддержки образования, функционирующих в университетах. Реализации элективных, факультативных учебных курсов, и практических работ будет стимулировать учащихся к углубленному изучения учебных предметов, достижению высоких образовательных результатов, формирования предметных, метапредметных и личностных результатов, обеспечит развитие способностей обучаемого к самостоятельному, индивидуальному и коллективному техническому творчеству, повышение уровня общетехнической грамотности, расширение общетехнического кругозора.

Для достижения поставленной цели решаются следующие задачи:

Обучающие задачи

Дать знания и сформировать навыки, позволяющие для старших школьников обеспечить:

- основные параметры электрических сигналов – носителей информации;
- основные способы генерирования и преобразования электрических сигналов;
- методы правильного выполнения измерений электрических величин в конкретных электронных схемах;

- способы правильного выбора средств измерения;
- принцип действия и назначение пассивных и активных компонентов электронной схемы;
- условные обозначения компонентов на электрических принципиальных схемах;
- методы расчета основных аналоговых схем и выбор подходящих компонентов;
- правила и законы алгебры логики;
- функциональное назначение основных логических элементов и их технические параметры;
- особенности современных микроконтроллеров и систем с их использованием;
- принципы построения и работы микроконтроллеров;
- структуру микроконтроллеров;
- типовой набор инструкций для программирования микроконтроллера;
- типовые периферийные компоненты микроконтроллера и способы их работы.

Развивающие задачи

Обучающиеся по данной программе должны:

- уметь анализировать простые аналоговые и цифровые электрические принципиальные схемы;
- уметь разрабатывать простые аналоговые схемы, состоящие из пассивных и активных компонентов;
- правильно выполнять измерения электрических величин в конкретных электронных схемах и правильно выбирать средства измерения;

- уметь синтезировать несложные логические схемы из стандартных ИС ЛЭ по заданному логическому уравнению или словесному описанию алгоритма;
- уметь разрабатывать простые алгоритмы и программы для микроконтроллеров по заданным условиям;
- иметь навыки работы с информационными ресурсами, технической литературой, Интернет-ресурсами.

Учебно-тематический план образовательной программы предусматривает изучение следующих тем, содержание, которых приведено ниже.

Аналоговая электроника

Основные понятия

Общие положения. Физические величины электрического поля. Потенциал, разность потенциалов (электрическое напряжение). Проводники, электрический ток в проводниках, сопротивление проводников, закон Ома. Понятие электродвижущей силы э.д.с. Электрическая ёмкость у конденсатора. Классификация и типы конденсаторов, маркировка. Индуктивность. Катушки индуктивности. Основные параметры и маркировка катушек индуктивности.

Линейные цепи постоянного тока при гармонических и импульсных воздействиях

Основные сведения о линейной цепи постоянного тока. Активные элементы, их характеристики и эквивалентные электрические схемы. Источники тока. Характеристики и параметры пассивных элементов цепи. Понятие вольт-амперной характеристики. Резисторы, их устройство и

основные параметры. Расчет цепей постоянного тока. Расчет цепей на основе законов Кирхгофа. Метод эквивалентного источника. Двухполюсники и многополюсники. Функциональные электронные устройства на резисторах. Делители напряжения. Общие сведения о гармонических колебаниях.

Векторные диаграммы. Электрические цепи с резистором и ёмкостью. Фильтр низких частот. Фильтр высоких частот. Резонанс напряжений. Резонанс токов. Частотно зависимые и частотно независимые делители напряжения. Активная, реактивная и полная мощность. Электрические импульсы и их параметры. Понятие ряда Фурье. Интегрирующая RC цепь. Дифференцирующая RC цепь. Развязывающий конденсатор в электронных устройствах.

Полупроводниковые приборы

В рамках данной лекции изучаются такие полупроводниковые приборы как диод, биполярный транзистор, полевой транзистор с р-п переходом между затвором и подложкой, МОП транзистор. При этом рассматривается ряд нижеследующих вопросов.

Полупроводники, электронно-дырочный переход. Полупроводниковый диод, вольт-амперная характеристика, эквивалентные электрические схемы, основные параметры. Разновидности полупроводниковых диодов. Классификация и система обозначений.

Амплитудное ограничение. Выпрямители. Умножители напряжения. Диодные коммутаторы. Измеритель частоты следования импульсов с накачкой заряда.

Устройство и основные физические процессы в биполярном транзисторе. Вольт-амперная характеристика и параметры биполярного транзистора. Эквивалентная схема транзистора. Основные параметры, классификация и система обозначений. Полевые транзисторы.

Функциональные элементы на транзисторах

Повторители напряжения. Однокаскадный транзисторный усилитель с эмиттерной стабилизацией. Двухтактный эмиттерный повторитель класса АВ. Дифференциальный усилитель на биполярных транзисторах. Транзисторные ключи.

Функциональные устройства на основе операционных усилителей

Устройство и основные параметры операционного усилителя. Обратные связи и их классификация. Инвертирующий усилитель на основе ОУ. Сумматор напряжений на основе ОУ. Не инвертирующий усилитель на основе ОУ. Повторитель напряжения на основе ОУ. Компенсационные стабилизаторы напряжения на основе ОУ. Генератор линейно-изменяющегося напряжения.

Цифровая электроника

Элементы алгебры логики. Схемотехника логических элементов

Понятие высказывания и логические связи. Логические элементы. Основные законы алгебры логики. Использование логических тождеств при построении логических устройств.

Импульсные сигналы и их параметры. Классификация логических элементов и основные параметры. Устройство и принцип действия базовых элементов ТТЛ и КМОП логики. Элементы транзисторно-транзисторной логики. Элементы КМОП логики. Особенности выходных каскадов цифровых микросхем. Основные статические характеристики.

Комбинационные цифровые устройства

Шифраторы, дешифраторы и преобразователи кодов. Схемы выборки (мультиплексоры и демультиплексоры). Мультиплексоры как универсальные

логические элементы. Мультиплексоры КМОП. Демультиплексоры. Цифровые компараторы.

Последовательностные цифровые устройства

Классификация триггерных устройств. RS-триггеры и их реализация на логических элементах. JK и D-триггеры. Триггер Шмитта. Область применения. Счетчики импульсов и их классификация. Синхронные счетчики. Счетчики-делители частоты. Регистры. Элементы индикации.

Цифро-аналоговые и аналого-цифровые преобразователи

Цифро-аналоговые преобразователи. Аналого-цифровые преобразователи. Общие положения. АЦП с параллельным преобразованием. АЦП последовательного преобразования с промежуточным преобразованием входного сигнала во временной интервал. АЦП поразрядного уравновешивания.

Количество часов, отводимых на изучение каждой темы, приведено в таблице .

Аналоговая электроника

№	Содержание разделов	Количество часов		
		Теорет	Практ	Всего
1	Основные понятия.	2	1	3
2	Линейные цепи при гармонических и импульсных воздействиях.	2	1	3
3	Полупроводниковые приборы.	2	1	3
4	Функциональные устройства на транзисторах.	4	2	6
5	Функциональные устройства на основе операционных усилителей.	2	1	3

Цифровая электроника

№	Содержание разделов	Количество часов		
		Теорет	Практ	Всего
1	Элементы алгебры логики. Схемотехника интегральных логических элементов	4	2	6
2	Комбинационные цифровые устройства	2	1	3
3	Последовательностные цифровые устройства	2	1	3
4	Цифро-аналоговые и аналого-цифровые преобразователи	4	2	6

Содержание образовательной программы

Содержание образовательной программы, расширяющее ранее представленный учебно-тематический план образовательной программы, приведено ниже.

Аналоговая электроника

Основные понятия

Все материальные объекты окружающего нас мира, обладают некоторыми объективно существующими свойствами: массой, протяженностью в пространстве, температурой и т. д. Изучением этих свойств и их взаимодействий занимается наука. Необходимо отметить, что никакое изучение свойств не возможно, если не выразить эти свойства в количественном отношении, т. е. некоторыми именованными числами. Зная количественную характеристику физического свойства, мы получаем возможность сопоставить между собой общие свойства каких-либо материальных объектов, например: температуры или массы. Кроме того, мы можем оценить, как изменяется изучаемое свойство от влияния различных

физических факторов, например: длина куска проволоки от температуры ее нагрева.

Свойства, общие для ряда объектов в качественном отношении, но различные в количественном отношении, называют физической величиной, а процесс определения их численного значения — измерением физической величины.

Очевидно, что для изменения необходимо иметь некую физическую величину той же природы, значение которой постоянно во времени и, практически, не изменяется от влияния различных физических факторов. Тогда такую физическую величину можно назвать единицей измерения, а сам процесс измерения будет представлять собой процесс сопоставления единицы измерения с измеряемой физической величиной. В результате процесса сопоставления мы сможем получить именованное число, выражающее, сколько единиц измерения или их дольных (кратных) значений содержится в измеряемой физической величине.

Единицы физической величины воспроизводят специальные технические устройства, называемые эталонами. Ввиду того, что изучение физических свойств материальных объектов и собственно процесс измерения основывается на операциях сопоставления, выбор размера единицы измерения физической величины носит условный характер. Так, например: за единицу длины можно было бы принять длину ручки ученика Иванова, если бы, благодаря какому-то чуду, длина этой ручки оставалась бы неизменной, и это можно было бы доказать. Ввиду того, что использовать эталоны для измерения в повседневной практике не представляется возможным, создаются специальные устройства (средства измерений) — измерительные приборы, которыми и пользуются для практических измерений. На занятиях по электронике вы будете использовать такие измерительные приборы, как: вольтметр, амперметр, осциллограф, и т. д.

Средства измерения фактически тоже воспроизводят единицы физических величин, как бы тиражируют эталоны (например, метры продаются в магазинах), однако в силу технологических особенностей их производства, воспроизводимые ими единицы измерения, отличаются от единиц, воспроизводимых эталонами. Это и обуславливает инструментальную (приборную) погрешность измерения какой-либо физической величины с помощью средств измерения. Значение этой погрешности указывается в паспорте на прибор.

Все взаимодействия между материальными объектами, находящимися на расстоянии друг от друга, объясняются наукой, наличием в пространстве, окружающем эти тела, неких полей, которые обуславливают силы взаимодействия. К такому объяснению причин взаимодействия тел на расстоянии наука шла более 300 лет. Так, взаимодействие двух электрически заряженных тел объясняется наличием электрического поля. Поля — это некая форма существования материи, порождаемая самими материальными объектами и проявляющаяся в виде силовых взаимодействий. Другими словами, мы можем обнаружить наличие поля только по его силовому действию и этим же силовым действием охарактеризовать свойства поля.

Вещества, по которым заряды могут легко перемещаться называют проводниками. Хорошими проводниками являются металлы. Как известно, металлы имеют кристаллическое строение. В узлах кристаллической решетки расположены положительные ионы (т. е. атомы, потерявшие электрон), а в пространстве между ними движутся свободные электроны. Движение этих электронов хаотично. Если проводник поместить в электрическое поле, то под действием сил поля свободные электроны начнут перемещаться в направлении противоположном направлению напряженности поля, т. е. через проводник будет течь электрический ток. Ток будет протекать до тех пор, пока заряды, положительные ионы и электроны, не распределятся таким

образом, что создаваемое ими электрическое поле внутри проводника не компенсирует внешнее поле, вызвавшее перемещение зарядов.

Явление разделения электрических зарядов в проводнике называется электростатической индукцией. Если поместить в поле металлическую замкнутую оболочку, то в результате электростатической индукции, поле внутри оболочки будет отсутствовать, т. е. поле созданное индуцированными зарядами компенсирует внешнее поле.

Это явление используется в электронике для защиты элементов электронных устройств от действия электрических полей.

Совершая направленное движение, электроны переносят через проводники определенный заряд. Таким образом, через поперечное сечение проводника в течение наблюдаемого интервала времени будет проходить какой-то заряд q . Величина этого заряда, отнесённая ко времени его прохождения через поперечное сечение проводника, является характеристикой силы тока.

$$I = \frac{q}{t}$$

Здесь, однако, следует сказать, что произвести измерение значения заряда, прошедшего через поперечное сечение проводника очень сложно, поэтому в качестве эталона, воспроизводящего единицу измерения силы тока, используют техническое устройство, основанное на эффекте магнитного взаимодействия двух проводников, через которые протекают одинаковые токи. При этом за единицу силы тока принимают силу тока, который, проходя по двум параллельным прямолинейным проводникам очень большой длины и ничтожно малого кругового сечения, расположенным на расстоянии одного метра один от другого в вакууме, притягивает их друг к другу с силой $2 \cdot 10^{-7}$ Ньютона на каждый метр длины. Эту силу тока назвали Ампером.

Единицу измерения заряда определяют через силу тока. Так: один Кулон равен электрическому заряду, проходящему через поперечное сечение проводника, при протекании через проводник тока силой 1 А за время 1 с. $1 \text{ Кл} = 1 \text{ А} \cdot 1 \text{ с}$, а $1 \text{ А} = 1 \text{ Кл / с}$.

Сила тока, протекающего в какой-либо среде, это физическая величина и как физическая величина она характеризует электропроводные свойства среды. Немецкий ученый Георг Ом установил, что во всех проводниках сила тока, протекающего через участок цепи, пропорциональна напряжению, действующему на этом участке.

$$I = G U.$$

Коэффициент пропорциональности G назван проводимостью, а величина обратная проводимости, названа сопротивлением и обозначается буквой $R = \frac{1}{G}$. Закон Ома может быть записан через R .

$$I = \frac{U}{R}.$$

Таким образом, вводится понятие сопротивления проводника. Теперь можно сформулировать закон Ома так: при данном значении напряжения сила тока обратно пропорциональна сопротивлению; при данном сопротивлении сила тока прямо пропорциональна напряжению.

Понятие емкости очень широко используется в электронике. Пожалуй, трудно будет найти электронное устройство или прибор, в котором не будет конденсатора (специальных радиодеталей, имеющих емкость) или не будет присутствовать электрическая емкость, образующаяся между токопроводящими элементами схемы, так называемая «паразитная» емкость.

Электрическая емкость — это физическая величина, характеризующая способность заряженного проводника и окружающей среды накапливать электрические поля.

Конденсатором называется система из двух проводников, которые в простейшем случае могут представлять собой две пластиинки, расстояние a между которыми мало по сравнению с размерами пластин, эти пластины называют обкладками конденсатора.

Вокруг любого проводника, через который протекает электрический ток, создается магнитное поле. Для получения более сильного магнитного поля используются катушки с обмоткой из проволоки.

Магнитные силовые линии выходят из катушки на том конце, где ток направлен против хода часовой стрелки и этот конец катушки является северным магнитным полюсом.

Магнитные силовые линии всегда замкнуты. При изменении силы тока, протекающего через катушку, изменяется магнитный поток, создаваемый этим током. Изменение магнитного потока индуцирует в катушке ЭДС, действие которой направлено на поддержание предшествующего состояния поля. Такое явление называется самоиндукцией. Явление самоиндукции характеризуется индуктивностью L . Индуктивность — это размерный коэффициент пропорциональности между скоростью измерения тока и индуцируемой при этом ЭДС. Самоиндукция равна:

$$e = -\frac{L \Delta i}{\Delta t}.$$

Единицы измерения индуктивности [Гн] (Генри). Такой индуктивностью обладает проводник, в котором возникает ЭДС самоиндукции, равная 1 В, при изменении тока на 1 А за 1 сек. Значение L зависит от конструктивного выполнения катушки. L пропорциональна

квадрату числа витков в катушке и ее сечению. Заметим, что ЭДС самоиндукции зависит только от скорости изменения тока.

Свойства катушки индуктивности целесообразно рассмотреть в сопоставлении со свойствами конденсатора. При таком сопоставлении наблюдается дуальность их свойств.

Дуальность свойств катушки индуктивности и конденсатора отражают в какой-то мере саму природу электромагнитного поля, содержащего электрическое и магнитное поля.

Катушки индуктивности широко используются при построении частотных фильтров генераторов гармонического напряжения, в радио и телеаппаратуре. В устройствах цифровой техники применяются в основном в качестве фильтров низких частот в источниках питания.

Основными параметрами катушки индуктивности являются следующие:

- значение индуктивности ($\Gamma\text{н}$, $\text{м}\Gamma\text{н}$, $\text{мк}\Gamma\text{н}$, $\text{н}\Gamma\text{н}$);
- активное сопротивление обмотки катушки;
- максимальный ток;
- добротность катушки, которая определяется на рабочей частоте, как отношение индуктивности и активного сопротивления катушки.

Линейные цепи постоянного тока при гармонических и импульсных воздействиях

В электронике в основном приходится иметь дело с воздействиями и откликами, изменяющимися во времени. В частности, они могут представлять собой колебательный процесс, описываемый функцией синуса или косинуса, т. е.

$$u = U_m \sin(\omega t + \varphi_u), \\ i = I_m \sin(\omega t + \varphi_i).$$

Такие колебательные процессы называются гармоническими. В электронике они широко используются в различной измерительной аппаратуре, телевизионной и радиоаппаратуре, а также во вторичных источниках питания, поскольку напряжение в сети тоже представляет собой гармонические колебания.

Следует отметить, что гармонические колебания представляют собой периодический процесс, т. е. любые значения u + периодически повторяются во времени, причем период повторения значительно меньше длительности колебательного процесса. Высказанное замечание позволяет сделать вывод, что начало координат временной диаграммы или, иначе, начало отсчета времени $t = 0$, следует понимать в том смысле, что в этот момент начинается наблюдение за процессом, который возник давно.

Гармонические колебания характеризуются такими параметрами как:

- амплитуда U_m , I_m — максимальное по модулю значение $u(t)$ или $i(t)$;
- период T — наименьший интервал времени, через который максимальные значения повторяются;
- частотой $f = 1 / T$; единицей измерения частоты принят Герц. $[1 \text{ Гц}] = [1 / \text{с}]$;
- угловая частота $\omega = 2\pi / T$; измеряется в радианах или градусах в секунду $[\text{рад} / \text{с}]$ или $[\text{град} / \text{с}]$. Очевидно, что $\omega = 2\pi f$.

Известно, что синус это функция угла, поэтому ωt представляет собой некоторый угол, величина которого пропорциональна времени.

$$\omega t = 2\pi \frac{t}{T} = k 2\pi,$$

где $k = t / T$.

Величина φ тоже угол, но не изменяющийся во времени. Его назвали начальной фазой. Естественно возникает вопрос: зачем ввели в аргумент синуса этот угол? Ведь и без него выражение $u(t) = U_m \sin(\omega t)$ полностью описывает колебательный процесс. Действительно, если бы мы имели дело только с единственным колебательным процессом, то вводить угол φ не было бы смысла, однако, когда мы наблюдаем два и более колебательных процессов, например: воздействие на цепь напряжение $u(t)$ и отклики тока $i(t)$ в ветвях, то введение углов φ_u и φ_i позволяет нам оценить на сколько отклики сдвинутся на оси времени относительно воздействия и между собой.

Колебания гармонической формы обладают следующей замечательной особенностью: если воздействие на линейную систему имеет вид одного или суммы нескольких гармонических колебаний одинаковой частоты, то в стационарном режиме отклики на это воздействие также имеют характер гармонических колебаний той же частоты.

Это важное свойство линейных систем существенно облегчает расчет цепей, находящихся под гармоническим воздействием.

Изменяющийся во времени гармонический ток $i(t)$ принято характеризовать некой постоянной величиной I_d , называемой действующим значением. Тепловой эффект такого тока на участке цепи с сопротивлением R за время, равное длительности одного периода, эквивалентен тепловому эффекту переменного тока за тоже время.

Электрический импульс представляет собой кратковременное изменение напряжения или тока. По существу, большая часть существующих электронных устройств работает в режиме импульсных воздействий.

По характеру изменения во времени электрические импульсы бывают: прямоугольные, экспоненциальные, трапецидальные, треугольные и других форм.

Основными параметрами импульсов являются: амплитуда U_A и длительность t_{ii} .

В том случае, когда параметры импульса несут какую-либо информацию, электрический импульс называют сигналом, а соответствующий параметр — информативным. В аналоговых устройствах таким параметром чаще всего является амплитуда, которая может принимать различные значения, а сам сигнал может быть любой формы. Очевидно, что различные электрические «помехи» всегда присутствующие в электрических цепях, могут приводить и приводят к изменению информативного параметра сигнала, и в конечном счете к искажению информации, содержащейся в сигнале, что является большой проблемой аналоговых устройств. В цифровой электронике информацией является сам факт появления электрического импульса, при этом его параметры: амплитуда и длительность не являются информативными. Обычно наличие импульса принимается за логическую «единицу», а его отсутствие за логический «ноль».

Следует отметить, что в цепях цифровых устройств, так же как и в аналоговых, тоже действуют различные электрические помехи. Однако, благодаря тому, что для цифровых устройств амплитуда импульса не является информативным параметром, ее всегда легко выбрать значительно больше уровня помех и тем самым существенно повысить

помехозащищенность схемы. Это обстоятельство выгодно отличает цифровые устройства от аналоговых.

Моделью электрических импульсов, используемых в цифровых устройствах, является прямоугольный импульс. Реальный импульс имеет более сложную форму и для его характеристики вводят следующие параметры:

Длительность переднего *фронта* t_{ϕ} импульса — интервал времени, в течение которого, значение напряжения увеличивается от $0,1U_A$ до $0,9U_A$.

ΔU — спад плоской вершины импульса

Длительность заднего *фронта* t_C импульса — интервал времени в течение которого напряжение уменьшается от значение $U_A - \Delta U$ до $0,1U_A$.

$U_{\text{обр}}$ — амплитуда обратного выброса.

Длительность t_x хвоста импульса.

Импульсы следующие один за другим, представляют импульсную последовательность. Когда интервал между следующими друг за другом импульсами постоянен, то такая последовательность импульсов называется периодической. Когда интервал между импульсами имеет разное значение от импульса к импульсу, то говорят, что наблюдается импульсный поток. Периодическая последовательность импульсов характеризуется такими параметрами как: периодом T , частотой f , $f = \frac{1}{T}$, длительностью t_i , скважностью $Q = \frac{T}{t_i}$ импульсов.

Практические занятия по линейным цепям при гармонических и импульсных воздействиях

1. Моделирование в специализированной программной среде линейных цепей при гармонических и импульсных воздействиях.

2. Исследование периодических электрических сигналов с помощью осциллографа, генератора.

Полупроводниковые приборы

В рамках данной лекции изучаются такие полупроводниковые приборы как диод, биполярный транзистор, полевой транзистор с р-п переходом между затвором и подложкой, МОП транзистор.

Уделяется внимание типам, назначению и основным свойствам полупроводниковых приборов. В частности, были рассмотрены диоды, такие как выпрямительные, высокочастотные, Шоттки, стабилитроны, светодиоды, фотодиоды, диодные сборки (мосты) и т.д. А так же транзисторы, такие как биполярные, полевые, MOSFET, IGBT и т.д. Отдельно рассматривался вопрос особенностей снятия характеристик этих компонентов и сравнения их с документацией, на примере снятия вольт-амперной характеристики (ВАХ) для диодов, определения напряжения насыщения р-п перехода по ней. Для транзисторов определения коэффициента передачи по току, напряжения насыщения и тока базы для биполярных транзисторов и напряжения открывания и емкости затвора для полевых транзисторов. При этом рассматривается ряд нижеследующих вопросов.

Полупроводниковые материалы по своей электропроводимости занимают промежуточное место между проводниками и диэлектриками. К полупроводниковым материалам относятся германий, кремний, селен. Внешние оболочки атомов германия или кремния имеют четыре валентных электрона. Пространственная кристаллическая решетка германия или кремния состоит из атомов, связанных друг с другом валентными

электронами. Такая связь, называемая ковалентной или парноэлектронной. Вокруг каждой пары атомов движутся по орбитам два валентных электрона.

При комнатной температуре вследствие тепловых колебаний атомов происходит разрыв некоторых связей, электроны отрываются от атомов и становятся свободными. Там, где электрон становится свободным, он оставляет после себя «дырку» (или отсутствие отрицательного заряда), которая тоже может казаться перемещающейся, если разорванная связь заполнится электроном из соседнего атома. Количество свободных электронов у чистого полупроводника очень незначительно, но всё же больше чем у диэлектрика. С увеличением температуры количество свободных электронов увеличивается, поскольку разрывается большее число связей, при этом сопротивление уменьшается. При введении примесей в полупроводник, например атомов пятивалентного мышьяка, число свободных электронов резко увеличивается. Объясняется это тем, что атомы мышьяка замещают атомы полупроводника, при этом четыре валентных электрона мышьяка образуют ковалентную связь с четырьмя соседними атомами полупроводника, а пятый валентный электрон атома мышьяка становится свободным. Атом мышьяка называют донорным атомом, а процесс добавления атомов примеси – легированием. При добавлении донорной примеси полупроводник называют полупроводником *n*-типа. Электроны у такого полупроводника основные носители, а «дырки» неосновные.

Когда полупроводниковый материал легирован трехвалентными атомами индия или бора, атомы примеси разместят свои три валентных электрона среди трех соседних атомов. Это создает в ковалентной связи «дырку». Наличие дополнительных «дырок» позволит электронам легко дрейфовать от одной ковалентной связи к другой. Атомы, которые вносят в полупроводник дополнительные «дырки» называют акцепторами. Количество «дырок» в таком полупроводнике значительно превышает

количество свободных электронов. Следовательно «дырки» являются основными носителями, а электроны неосновными. Поскольку основные носители имеют положительный заряд, то такой полупроводник называют полупроводником *p*-типа. Область на границе двух полупроводников с различными типами проводимости называется электронно-дырочным или *n-p*-переходом. Если подключить источник внешнего напряжения положительным полюсом к полупроводнику *p*-типа, а отрицательным к полупроводнику *n*-типа, то электрическое поле, созданное внешним источником напряжения, будет действовать навстречу полю *E*. Результирующее поле становится слабее, и разность потенциалов в переходе уменьшается и уменьшается высота потенциального барьера.

Если поменять полярность внешнего источника напряжения, то поле внешнего источника будет складываться с полем перехода, т. е. результирующее поле на переходе увеличится, возрастет и высота потенциального барьера. Диффузионный ток становится равным нулю поскольку собственные энергии носителей уже будут недостаточны для преодоления барьера.

Полупроводниковый диод — это устройство, созданное путем соединения двух полупроводников *n* и *p*-типа, в месте контакта которых создается *n-p* переход. Диод имеет два вывода. Вывод, подсоединеный к *p*-области, называется анодом, а вывод, подсоединеный к *n*-области, называется катодом. Электрические свойства диода, как и любого двухполюсника, отражает его ВАХ. В отличие от резисторов ВАХ диода имеет нелинейный вид. Поэтому диоды являются нелинейными элементами.

Участок ВАХ для прямого тока в начале имеет значительную нелинейность, так как при увеличении $U_{\text{пр}}$ сопротивление запирающего слоя уменьшается. Но при $U_{\text{пр}} \sim 0,35$ В запирающий слой практически исчезает и остается только сопротивление *n* и *p*-областей, которые приближенно можно

считать линейными. Для кремниевых диодов значение $U_{\text{пр}}$, при котором характеристику можно считать линейной, составляет величину порядка 0,6 В. Небольшая нелинейность этого участка ВАХ объясняется тем, что при увеличении тока $I_{\text{пр}}$ в n и p -области нагреваются от чего их сопротивление уменьшается. Обратный ток при увеличении обратного напряжения сначала несколько возрастает, вследствие уменьшения значения тока диффузии, и затем практически не изменяется. При некотором значении обратного напряжения возникает электрический пробой n - p -перехода.

Транзисторы это такие радиоэлементы, которые позволяют создавать устройства, способные выполнять операцию усиления электрического сигнала.

Биполярный транзистор в своей основе содержит три слоя полупроводника (p - n - p или n - p - n) и соответственно два p - n -перехода. Каждый слой полупроводника через невыпрямляющий контакт металл-полупроводник подсоединен к внешнему выводу.

Средний слой и соответствующий вывод называют базой, один из крайних слоев и соответствующий вывод называют эмиттером, а другой крайний слой и соответствующий вывод — коллектором.

Транзистор называют биполярным, так как в процессе протекания электрического тока участвуют носители электричества двух знаков — электроны и дырки. Но в различных типах транзисторов роль электронов и дырок различна.

Концентрация атомов примеси (и свободных электронов) в эмиттере сравнительно велика, поэтому этот слой низкоомный. Концентрация атомов примеси (и дырок) в базе сравнительно низка, поэтому этот слой высокоомный. Концентрация атомов примеси (и свободных электронов) в коллекторе может быть как больше концентрации атомов примеси в базе, так

и меньше ее. Инжекцией носителей заряда называется ведение носителей заряда через пониженный, под действием прямого напряжения, потенциальный барьер в область, где эти носители являются неосновными.

Вследствие очень малой толщины базы, почти все свободные электроны, инжектированные из эмиттера в базу, достигают коллекторного перехода. Только незначительная их часть поглощается дырками базовой области. Процесс объединения свободного электрона и дырки называется рекомбинацией зарядов. Поскольку в установившемся режиме число дырок в базе должно оставаться неизменным, убыль дырок компенсируется движением свободных электронов из области базы к положительному полюсу источника $U_{бэ}$.

Обратное смещение коллекторного перехода способствует тому, что электроны, подошедшие к нему, захватываются электрическим полем перехода и переносятся в коллектор. В то же время это поле препятствует переходу электронов из коллектора в базу.

Это очень важное свойство транзистора, именно закрытый коллекторный переход обеспечивает работу транзистора в режиме усиления, поскольку ток в коллекторе зависит только от тока в эмиттере и практически не зависит от значения разности потенциалов между коллектором и эмиттером и между коллектором и базой.

Между токами $I_э$, $I_к$ и $I_б$ существует следующее соотношение,

$$I_э = I_к - I_б.$$

Причем $I_э \gg I_к$.

Ток коллектора $I_к$ лишь незначительно меньше тока эмиттера, т. е. $I_к \approx I_э$. Более точно:

$$I_к = \alpha_{ct} i_э + I_{ко}.$$

Где $\alpha_{ст}$ — так называемый статический коэффициент передачи эмиттерного тока (термин статический подчеркивает тот факт, что этот коэффициент связывает постоянные токи); $I_{ко}$ — так называемый обратный ток коллектора.

Схемы включения транзисторов с общей базой и общим эмиттером имеют разные входные характеристики, отражающие зависимость входного тока от напряжения, действующего на базо-эмиттерном переходе. У схемы с общим эмиттером входным током является ток базы I_b . Разные входные характеристики, отражающие зависимость входного тока от напряжения, действующего на базо-эмиттерном переходе. У схемы с общей базой входным током является ток эмиттера I_e , а у схемы с общим эмиттером входным током является ток базы I_b . Разные входные токи обусловлены тем, что схемы имеют различное входное сопротивление. Очевидно, что поскольку I_e много больше I_b , схема с общей базой имеет значительно меньшее входное сопротивление, чем схема с общим эмиттером. В этом заключается основное отличие рассмотренных схем включения транзистора. С точки зрения результата действия источника напряжения, действующего на базо-эмиттерном переходе, обе схемы идентичны, поскольку при заданном значении $U_{бэ}$, величина тока коллектора I_k у обоих схем включения транзистора будет одинакова. Зависимость вида $I_k = f(U_{кэ})$ называется передаточной характеристикой транзистора. Фактически эта характеристика повторяет входную характеристику $I_e = f(U_e)$ схемы с общей базой, поскольку $I_e \approx I_k$.

Биполярные транзисторы фактически являются токовыми элементами, поскольку выходной ток у них есть функция входного тока. Входное сопротивление биполярных транзисторов мало, в результате чего источник сигнала работает на низкоомную нагрузку. Если его внутреннее сопротивление соизмеримо с входным сопротивлением транзистора, или больше, то будет

наблюдаться эффект деления (уменьшения) значения сигнала, кроме того могут возникать его нелинейные искажения.

Полевые транзисторы это полупроводниковые приборы, в которых выходным током управляют с помощью электрического поля, вследствие чего, входное сопротивление транзистора очень велико.

Различают два вида полевых транзисторов: с управляющим переходом и с изолированным затвором. На границе двух полупроводников *p* и *n* типа образуется область *p-n*-перехода, обедненная подвижными носителями и имеющая очень большое удельное сопротивление. Вследствие чего, концентрация основных носителей в *n*-области больше, чем в *p*-области, область *p-n*-перехода сосредоточена в основном в слое *p*.

Электрод, из которого в канал входят основные носители заряда называют истоком, а электрод, к которому они движутся – стоком. Электрод, с помощью которого управляют током основных носителей называют затвором. Подавая на затвор положительное относительно истока напряжение (т. е. обратное для *p-n*-перехода), область *p-n*-перехода расширяется. Увеличение ширины *p-n*-перехода уменьшает толщину канала и, следовательно, увеличивает его сопротивление. Это приводит к уменьшению тока, протекающего в канале. Именно это явление позволяет управлять током с помощью напряжения. Очевидно, что ток в канале возможен только при подключении источника U_{ic} . При определенном значении напряжения U_{zi} канал может быть полностью перекрыт и тока не будет.

Необходимо отметить, что обратное напряжение в различных областях *p-n*-перехода разное и увеличивается от истока к стоку. Действительно, если в районе истока оно равно запирающему напряжению U_{zi} , то в районе стока оно равно сумме напряжений $|U_{zi}| + |U_{ic}|$. Вследствие этого ширина запирающего слоя у стока больше, чем у истока.

Для полевых транзисторов с n-каналом полярность напряжений источников $U_{зи}$ и $U_{ис}$ противоположна.

Дальнейшим развитием полевых транзисторов являются транзисторы с изолированным затвором. У них металлический затвор отделен от полупроводника тонким слоем диэлектрика. В качестве диэлектрика обычно используют диоксид SiO_2 . Такие полевые транзисторы получили название МОП – транзисторы (от слов «металл – оксид – полупроводник»).

Основанием транзистора служит кремниевая пластина с электропроводностью *p*-типа. В ней созданы две области с повышенной проводимостью типа *n*. Эти области являются истоком и стоком. Между ними имеется тонкий приповерхностный канал *n*-типа. Обычно подложка соединяется с истоком. Если между истоком и стоком приложить напряжение, то через канал потечет ток, представляющий собой поток электронов. При подаче на затвор напряжения, отрицательного по отношению к истоку и кристаллу, в канале создается поперечное электрическое поле, под влиянием которого электроны выталкиваются из канала в кристалл, при этом канал обедняется электронами и ток стока уменьшается. Чем больше будет отрицательное напряжение затвора, тем меньше будет этот ток. Такой режим называют режимом обеднения. Если на затвор подать положительное напряжение, то под действием поля из кристалла в канал будут приходить электроны, вследствие чего проводимость канала увеличивается и ток стока возрастает. Этот режим называют режимом обогащения.

При возрастании напряжения $U_{си}$ от нуля сначала ток стока увеличивается в соответствии с законом Ома, однако, начиная с некоторого значения *c*, ток I_c остается постоянным. Это объясняется тем, что начиная с данного значения $U_{си}$ канал начинает сужаться, особенно около стока, так как на *p-n*-переходе между каналом и кристаллом возрастает обратное напряжение и область этого перехода, обедненная носителями, расширяется и сопротивление

канала увеличивается. Таким образом, ток стока испытывает два противоположных влияния и в результате остается постоянным. В этом случае, если кристалл имеет электропроводность *n*-типа, канал должен быть *p*-типа и полярность напряжений источников $U_{зи}$ и $U_{си}$ нужно изменить на противоположную.

Другим типом МОП – транзистора является транзистор с индуцированным каналом. От предыдущего транзистора он отличается тем, что канал возникает только при подаче на затвор напряжения положительной полярности. При отсутствии этого напряжения канала нет. Между истоком и стоком расположен только кристалл *p*-типа и на *p-n*-переходе получается обратное напряжение. В этом состоянии напряжение между истоком и стоком очень велико, т. е. транзистор заперт.

При подключении источников напряжения к выводам транзистора, причем на затворе напряжение положительно относительно истока, при некотором значении $U_{зи}$ между истоком и стоком возникает токопроводящий канал. Этот канал образуется за счет электронов, перемещающихся под действием поля затвора из кристалла *p*-типа, а также из областей n^+ к приповерхностному слою затвора. Когда концентрация этих электронов превысит концентрацию «дырок» кристалла, т. е. произойдет инверсия электропроводности приповерхностного слоя, образуется канал *n*-типа и транзистор начнет проводить ток. Чем больше положительное напряжение на затворе, тем больше проводимость канала, тем больше и ток стока. Таким образом, транзистор работает только в области обогащения.

Если использовать подложку *n*-типа, то получится индуцированный канал *p*-типа, при этом и области *n* должны быть изменены на *p*.

Практические занятия по полупроводниковым приборам

1. Исследование схем включения транзисторов (ОЭ, ОБ, ОК).

2. Моделирование полупроводниковых приборов в специализированной программной среде.

Функциональные элементы на транзисторах

Основной акцент необходимо сделать на практическое применение различных схем на примере наиболее часто встречающихся задач. Рассматриваются такие схемы как:

1. Выпрямительный диодный мост;
2. Стабилитроны для создания порога включения (срабатывания);
3. Расчет цепи включения светодиодов;
4. Мультивибратор и одновибратор;
5. Усилительные схемы на биполярном транзисторе с общим эмиттером;
6. Усилительная схема на биполярном транзисторе с общим коллектором (эмиттерный повторитель);
7. Ключевая схема на биполярном транзисторе;
8. Ключевая схема на MOSFET транзисторах;
9. Двухкаскадный усилитель на биполярных транзисторах;

Помимо демонстрации решения задач на примере полупроводниковых компонентов рассматриваются основные ошибки их реализации, а так же типовые неисправности и методы их устранения. Особое внимание необходимо уделить использованию контрольно-измерительных приборов, начиная от встроенного измерителя параметров транзистора в мультиметре и заканчивая осциллографом и генератором.

Необходимо в качестве исполнительных элементов использовать такие компоненты как светодиоды, лампочки, двигатели, динамики и прочие. Это позволит наиболее наглядно продемонстрировать особенности применения и свойства тех или иных электронных схем включения полупроводниковых приборов.

Усилитель напряжения. Основное назначение усилителя – усилить электрический сигнал. Последний всегда формируется неким электрическим устройством, которое может быть представлено в виде реального источника переменного напряжения, содержащего идеальный источник \tilde{U}_0 и внутреннее сопротивление $R_{\text{вн}}$.

Идеальный усилитель напряжения должен обеспечивать постоянный коэффициент усиления X при заданном диапазоне изменения параметров входного сигнала и заданном диапазоне изменения параметров среды. Если входной сигнал представляет собой гармоническое напряжение, то его основными параметрами считаются амплитуда U_A и частота $f = 2\pi\omega$. Кроме этого идеальный усилитель не должен искажать вид функции входного сигнала.

Очевидно, что идеальный усилитель построить невозможно. У любого реального усилителя коэффициент усиления будет в той или иной степени зависеть от параметров входного сигнала и от температуры окружающей среды. Если требования к усилителю не столь критичны, то для усиления напряжения можно использовать простой усилитель, выполненный на основе схемы с общей базой или с общим эмиттером.

Рассмотрим усилитель, выполненный на основе схемы с общим эмиттером. Для построения усилителя необходимо включить в коллекторную цепь транзистора резистор R_k , который будет преобразовывать приращения коллекторного тока транзистора в выходное напряжение усилителя. Кроме этого в схему с общим эмиттером необходимо включить цепи, обеспечивающие требуемый начальный режим транзистора и стабилизацию его рабочей точки.

Повторители напряжения — это устройства, обладающие большим входным и небольшим выходным сопротивлением, у которых выходной

сигнал повторяет входной. Эмиттерные повторители используются для согласования усилителей или иных электронных устройств, имеющих небольшое входное сопротивление, с источниками сигнала с большим внутренним сопротивлением, а также для согласования выхода усилителя с низкоомной нагрузкой. Эмиттерные повторители строятся на основе схемы с общим коллектором. У этой схемы потенциал коллектора не изменяется, поэтому схема получила название — схема с общим коллектором. Источник U_b включается между базой и общей точкой, а выходное напряжение снимается с резистора R_3 .

Поскольку повторители могут работать в режиме большого сигнала, при передаче сигнала отрицательной полярности начальный ток транзистора уменьшается, и рабочая точка транзистора смещается в область нелинейного участка ВАХ транзистора, что приводит к существенным нелинейным искажениям сигнала. Если ток нагрузки будет равен начальному току транзистора, последний войдет в режим отсечки. Сильно увеличивать начальный ток транзистора нецелесообразно, поскольку при этом увеличивается потребляемая схемой мощность.

Дифференциальный усилитель — это устройство, предназначенное для усиления разности двух входных сигналов. Причем эти сигналы могут быть как постоянные, так и изменяющиеся во времени. Дифференциальный усилитель является основой операционных усилителей и многих электронных устройств.

Транзисторный ключ является основным элементом цифровой электроники. Параметры и характеристики транзисторных ключей в основном определяют свойства цифровых схем. Транзисторные ключи могут быть выполнены и на полевых транзисторах. Такие ключи широко используются для коммутации аналоговых и цифровых сигналов.

В аналоговых ключах обычно используют транзисторы с управляющим *p-n*-переходом или МДП-транзисторы с индуцированным каналом. В цифровых ключах обычно используют МДП-транзисторы с индуцированным каналом. В последнее время полевые транзисторы все чаще используют в силовой импульсной электронике.

Ключи на полевых транзисторах отличаются малым остаточным напряжением. Они могут коммутировать слабые сигналы (в единицы микровольт и меньше). Это следствие того, что выходные характеристики полевых транзисторов проходят через начало координат.

Минимальное сопротивление включенного ключа на полевом транзисторе может быть больше, чем ключа на биполярном транзисторе (т. е. наклон самой круто поднимающейся характеристики полевого транзистора может быть меньше, чем наклон соответствующей характеристики на биполярном транзисторе). Поэтому при значительном токе падение напряжения на полевом транзисторе может быть больше, чем падение напряжения на биполярном транзисторе.

Иногда остаточным напряжением на ключе называют не то напряжение, которое соответствует нулевому току, а то, которое соответствует некоторому значительному току ключа. Это нужно иметь в виду, чтобы понять смысл на первый взгляд парадоксального утверждения, встречающегося у некоторых авторов и состоящего в том, что остаточное напряжение ключей на полевых транзисторах больше, чем ключей на биполярных транзисторах, и поэтому «полевой транзистор обладает худшими ключевыми свойствами по сравнению с биполярным». Кстати будет сказать, что наличие подобных на первый взгляд противоречивых утверждений полезно воспринимать как знак того, что выбор конкретного решения (в данном случае выбор для коммутации полевого или биполярного транзистора) следует осуществлять на основе всестороннего анализа.

В статическом состоянии ключ на полевом транзисторе потребляет очень малый ток управления. Однако этот ток увеличивается при увеличении частоты переключения. Очень большое входное сопротивление ключей на полевых транзисторах фактически обеспечивает гальваническую развязку входных и выходных цепей. Это позволяет обойтись без трансформаторов в цепях управления. Ключи на полевых транзисторах часто менее быстродействующие в сравнении с ключами на биполярные транзисторах. Напряжение на ключе в его включенном состоянии $U_{\text{вкл}}$ зависит от сопротивления стока R_c , величины входного сигнала и особенностей стоковых характеристик транзистора. Скорость изменения напряжения на выходе определяется сопротивлением R_c , емкостью C_H и частотными свойствами транзистора. В ключах на комплементарных транзисторах в каждом из двух установившихся режимов, т. е. и в открытом, и в закрытом состоянии, ключ практически не потребляет ток от источника питания. Это первое важное достоинство комплементарного ключа. Вторым важным достоинством комплементарного ключа является резкое отличие выходного напряжения в открытом состоянии ключа (единицы микровольт и менее) и выходного напряжения в закрытом состоянии (это напряжение меньше напряжения питания всего лишь на единицы микровольт и менее). Это обеспечивает высокую помехоустойчивость цифровых схем на комплементарных ключах. Третьим важным достоинством комплементарного ключа является его повышенное быстродействие.

Описанные достоинства, а также отработанность технологии изготовления явились причиной широкого использования КМОП-ключей. На полевых транзисторах, работающих в ключевом режиме, можно строить коммутаторы аналоговых сигналов.

Практические занятия по функциональным элементам на транзисторах

1. Исследование свойств и параметров однокаскадного усилителя на транзисторах.
2. Моделирование в специализированной программной среде усилительных каскадов на транзисторах.
3. Моделирование в специализированной программной среде дифференциальных каскадов и усилителей мощности.
4. В специализированной программной среде собрать измерительную схему для получения семейства выходных характеристик транзистора 2N2218, включённого по схеме с общей базой при условии, что напряжение $U_{\text{кб}}$ изменяется от 0 до 10В с шагом 0,1В, ток эмиттера $I_{\text{э}}$ - от 2mA до 10mA с шагом 2mA. Определить номер выходного узла измерительной схемы, заполнить окно анализа DC Sweep, получить семейство выходных характеристик и определить с помощью курсоров выходное сопротивление транзистора при $I_{\text{э}} = 8\text{mA}$.
5. В специализированной программной среде собрать измерительную схему для получения входных характеристик транзистора 2N2218, включённого по схеме с общей базой при условии, что входное напряжение $U_{\text{вб}}$ изменяется от 0,5В до 0,9В с шагом 0,01В, при выходном напряжении $U_{\text{кб}} = 5\text{V}$. Определить номер выходного узла измерительной схемы, заполнить окно анализа DC Sweep, получить входную характеристику и определить с помощью курсоров входное сопротивление транзистора при двух значениях входного тока $I_{\text{э}} = 2\text{mA}$ и $I_{\text{э}} = 20\text{mA}$.
6. В специализированной программной среде собрать измерительную схему для получения передаточной характеристики транзистора 2N2218, включённого по схеме с общим эмиттером, при условии, что входное напряжение $U_{\text{бэ}}$ изменяется от 0,5В до 0,9В с шагом 0,01В, при выходном напряжении $U_{\text{кэ}} = 10\text{V}$. Определить номер выходного узла измерительной

схемы, заполнить окно анализа DC Sweep, получить передаточную характеристику и определить с помощью курсоров крутизну транзистора при двух значениях выходного тока $I_k = 1\text{mA}$ и $I_k = 5\text{mA}$.

7. В специализированной программной среде собрать измерительную схему для получения передаточной характеристики транзистора 2N2218, включённого по схеме с общей базой, при условии, что входное напряжение U_{ϑ_B} изменяется от 0,5В до 0,9В с шагом 0,01В, при выходном напряжении $U_{kб} = 10\text{V}$. Определить номер выходного узла измерительной схемы, заполнить окно анализа DC Sweep, получить передаточную характеристику и определить с помощью курсоров крутизну транзистора при двух значениях выходного тока $I_k = 2\text{mA}$ и $I_k = 8\text{mA}$.

8. В специализированной программной среде собрать измерительную схему для получения стоко-затворной характеристики полевого транзистора BF244A с управляемым р-п переходом при условии, что напряжение U_{zi} изменяется от -2В до 0 с шагом 0,01В, при напряжении $U_{ci} = 10\text{V}$. Определить номер выходного узла измерительной схемы, заполнить окно анализа DC Sweep, получить стоко-затворную характеристику и определить с помощью курсоров крутизну транзистора при двух значениях тока стока $I_c = 0,5\text{mA}$ и $I_c = 2\text{mA}$.

9. В специализированной программной среде собрать измерительную схему для получения стоковой характеристики полевого транзистора BF244A с управляемым р-п переходом при условии, что напряжение U_{zi} изменяется от -2В до 0 с шагом 0,5В, а стоковое напряжение U_{ci} изменяется от 0 до 10В с шагом 0,1В. Определить номер выходного узла измерительной схемы, заполнить окно анализа DC Sweep, получить стоковую характеристику и определить с помощью курсоров дифференциальное сопротивление канала при двух значениях напряжения $U_{zi} = 0$ и $U_{zi} = -1\text{V}$.

10. Определить начальный ток I_{Θ_H} транзистора при условии, что используется кремниевый транзистор, $E_K = 15V$, $R_1 = 10k\Omega$, $R_2 = 1k\Omega$, $R_s = 300\Omega$.

11. Определить начальный ток I_{Θ_H} транзистора при условии, что используется кремниевый транзистор, $E_K = E_\Theta = 15V$, $R_s = 7,5k\Omega$.

12. Определить коэффициент усиления по напряжению и входное сопротивление усилителя при условии, что начальный ток эмиттера равен 2mA, коэффициент передачи тока базы транзистора $\beta = 100$ и $R_K = 5k\Omega$.

13. В программной среде EWB собрать схему усилителя, при условии, что используется кремниевый транзистор, $E_K = E_\Theta = 15V$, $R_{BH} = 100\Omega$, $R_k = 5k\Omega$, $R_s = 7,5k\Omega$, $C_s = 200\mu F$. Используя виртуальный амперметр измерить начальный ток коллектора. Используя виртуальный осциллограф, определить коэффициент усиления усилителя по напряжению.

14. Определить ток I_0 в объединённой эмиттерной цепи транзисторов в схеме при условии, что используется пара кремниевых транзисторов, $E_\Pi = 15V$ и $R_s = 7,5k\Omega$.

15. Определить коэффициент усиления и входное сопротивление для дифференциального входного сигнала усилителя при условии, что ток I_0 в объединённой эмиттерной цепи транзисторов равен 1mA и $R_K = 5k\Omega$.

16. В специализированной программной среде собрать схему усилителя, при условии, что используется пара транзисторов 2N2218 из библиотеки среды и $E_\Pi = 15V$, $R_k = 5k\Omega$, $R_s = 7,5k\Omega$. Используя виртуальный амперметр измерить начальные токи коллекторов транзисторов. Используя виртуальный осциллограф, определить коэффициент усиления дифференциального сигнала на частоте 1кГц.

17. В специализированной программной среде собрать схему усилителя, при условии, что используется пара транзисторов 2N3702 из библиотеки среды и $E_{\Pi} = 10\text{В}$, $R_k = 3\text{k}\Omega$, $R_o = 5\text{k}\Omega$. Используя виртуальный осциллограф, определить коэффициент усиления дифференциального сигнала на частоте 1кГц. Используя виртуальный осциллограф, определить коэффициент передачи синфазного сигнала на той же частоте.

Функциональные устройства на основе операционных усилителей

В лекционном занятии обсуждаются вопросы содержания и методики преподавания в школе начальных сведений об операционных усилителях и функциональных устройствах на операционных усилителях. Особенности построения устройств на базе операционных усилителей и их значимость в аналоговой электронике. Безусловно, операционный усилитель является ключевым элементом современных аналоговых электронных схем, поэтому этому разделу должно быть удалено особое внимание. На базе операционных усилителей реализуются как непосредственно усилительные каскады, так и фильтры, генераторы, линии задержки и т.д.

Основной целью изучения операционных усилителей является получение практических навыков построения различных схем, изучения их свойств, характеристик и области применения. Изучение данного раздела начинается с изучения базовых усилительных схем и их особенностей, таких как схема инвертирующего усилителя, не инвертирующего усилителя и инструментального усилителя. Учащийся должен научиться рассчитывать коэффициент усиления, определять максимальную частоту подаваемого сигнала, а так же допустимое входное и выходное сопротивления источника сигнала и нагрузки соответственно.

В рамках преподавания данного раздела, первую часть практических занятий можно провести на специализированном программном обеспечении, предназначенном для моделирования электронных схем. Это позволит

избежать большого количества ошибок при последующих практических работах. Данное программное обеспечение распространяется бесплатно ключевыми производителями операционных усилителей, такими как Texas Instruments, Analog Devices и Linear Technologies.

После получения практических навыков с усилительным режимом работы рекомендуется перейти к различным фильтрам и рассмотреть следующие виды:

1. Фильтр нижних частот.
2. Фильтр верхних частот.
3. Полосовой фильтр.
4. Режекторный фильтр (может встречаться название как фильтр «пробка» или notch фильтр).

Чтобы не загружать школьников большим количеством формул и расчетов, рекомендуется пользоваться специализированным программным обеспечением позволяющим рассчитать номинальные значения всех необходимых линейных компонентов, таких как резисторы и конденсаторы. На первом этапе это, в том числе, позволит не «отбить» желание заниматься электроникой у начинающих детей. Данное программное обеспечение так же находится в свободном доступе на web-сайтах производителей операционных усилителей.

Далее рекомендуется рассмотреть с учащимися, возможно в факультативном порядке, генераторы, дифференцирующие и интегрирующие цепи на базе операционных усилителей, а так же построение аналого-цифровых и цифро-аналоговых преобразователей.

В настоящее время операционные усилители (ОУ) в интегральном исполнении являются самыми универсальными аналоговыми элементами. На

их основе стоятся практически вся современная аналоговая электронная аппаратура.

Независимо от сложности принципиальной схемы интегральный ОУ обычно содержит следующие функциональные узлы: входной дифференциальный усилитель (ДУ), усилители напряжения (УН), как правило, выполненные на дифференциальных усилителях, схему сдвига постоянного уровня (СУ) и выходной каскад – двухтактный эмиттерный повторитель (ВК), работающий в режиме класса АВ. В принципе, все перечисленные устройства нам уже знакомы. Отметим только следующее: благодаря интегральной технологии параметры входных транзисторов дифференциального усилителя практически идентичны, что позволяет значительно уменьшить чувствительность усилителя к синфазному сигналу, а также достичь очень высокой температурной стабильности усилителя. Входной каскад имеет небольшой коэффициент усиления по сравнению с последующими усилителями, что снижает влияние на параметры ОУ их дисбаланс.

Идеальным ОУ является усилитель, обладающий следующими параметрами:

- коэффициент усиления бесконечно велик ($A \rightarrow \infty$).
- входное сопротивление.
- выходное сопротивление.
- полоса пропускания $\Delta F \rightarrow \infty$.
- выходное напряжение равно нулю при нулевом напряжении на входе.

Возникает вопрос: зачем нужен бесконечно большой коэффициент усиления? Ведь при $A \rightarrow \infty$ мы практически не сможем усиливать разностный сигнал, поскольку при его значении близком к нулю на выходе

усилителя уже будет максимально возможное напряжение, ограничиваемое значениями питающего напряжения. Все дело в том, что ОУ используется только с внешними цепями обратной связи, вид которых определяет и задает функциональное назначение схемы с ОУ. Принцип действия обратной связи мы рассмотрим ниже, и тогда станет понятно, зачем нужен бесконечно большой коэффициент усиления.

Параметры идеального усилителя не могут быть реализованы на практике, однако развитие технологии и схемотехники идет в направлении приближения характеристик реальных усилителей к идеальным. Рассмотрим параметры реальных ОУ.

Коэффициент усиления A определяется отношением изменения выходного напряжения к вызвавшему его изменению напряжению между дифференциальными входами усилителя, при разомкнутой цепи обратной связи. В современных ОУ A достигает значений десятков, и даже сотен тысяч. У операционных усилителей без обратной связи коэффициент усиления зависит от сопротивления нагрузки, напряжения источников сигнала, температуры и др.

Входное сопротивление R_{bx} определяется отношением небольшого изменения дифференциального входного напряжения к результирующему изменению входного тока.

$$R_{\text{bx}} = \frac{\Delta U_{\text{bx}}}{\Delta I_{\text{bx}}}$$

Входные токи I_{bx} Входные токи обусловлены базовыми точками входных транзисторов дифференциального каскада. У операционных усилителей, использующих полевые транзисторы, на входе дифференциального каскада I_{bx} имеют величину до 200 пА. У

операционных усилителей с биполярными транзисторами $I_{\text{вх}}$ составляет сотни нА.

Разность входных токов $\Delta I_{\text{вх}}$ определяется как разность входных токов, протекающих через входы усилителя при отсутствии входного сигнала. У операционных усилителей с полевыми транзисторами $\Delta I_{\text{вх}}$ составляет порядка 100 пА. У операционных усилителей с биполярными транзисторами $\Delta I_{\text{вх}}$ составляет величину до 200 нА.

Напряжение смещения нуля. Как уже отмечалось выше, идеальный ОУ при входном напряжении равном нулю должен иметь нулевое напряжение на выходе. Однако в реальном усилителе ввиду целого ряда причин: наличие разностного входного тока, дисбаланса усилительных каскадов и т. д. – на выходе усилителя наблюдается некоторое напряжение отличное от нуля. Величина этого напряжения, а главное, его уход (дрейф) от влияния температуры, времени не отличим от полезного сигнала, и является одним из главных ограничений, определяющим точность работы ОУ. Напряжение смещения нуля определяется величиной напряжения, которое необходимо приложить между входами усилителя, чтобы напряжение на выходе усилителя стало равным нулю. Типичное значение смещения нуля у современных усилителей составляет единицы мВ, а его дрейф 1 мкВ / 1 С°.

Понятие «обратная связь» (ОС) широко используется как в технике, так и других областях знаний. Обратной связью называют влияние некоторой выходной величины на некоторую входную величину, которая в свою очередь существенным образом влияет на выходную величину (определяет эту выходную величину). Существуют два вида ОС — положительная и отрицательная. Рассмотрим отрицательную ОС, широко используемую в усилителях. При наличии отрицательной обратной связи выходной сигнал таким образом влияет на входной, что последний уменьшается и соответственно приводит к уменьшению выходного сигнала. Очевидно, что

для этого необходимо, чтобы сдвиг фаз между выходным и входным сигналом был равен $-\pi$. Коэффициент усиления зависит только от свойств цепи обратной связи и практически не зависит от свойств самого операционного усилителя. Цепи обратной связи строятся на основе пассивных элементов (резисторов, конденсаторов). Если использовать высокоточные резисторы и конденсаторы с малой зависимостью их параметров от температуры, легко построить усилитель с высокой температурной стабильностью, значения которой будут определяться практически только температурным дрейфом напряжения смещения операционного усилителя. Частотные свойства усилителя, охваченного отрицательной обратной связью, значительно улучшаются.

Сумматор напряжений. На основе схемы инвертирующего усилителя, можно легко построить сумматор напряжений. через каждый из резисторов R_1, R_2, \dots, R_n , подключенных к инвертирующему входу ОУ, протекают токи I_1, I_2, \dots, I_n , значения которых определяются в соответствии с законом

$$\text{Ома, как: } I_1 = \frac{U_{\text{вх}1}}{R_1}; I_2 = \frac{U_{\text{вх}2}}{R_2}; \dots; I_n = \frac{U_{\text{вх}n}}{R_n}.$$

Ток, протекающий через резистор R_{oc} будет равен сумме токов I_1, I_2, \dots, I_n , т. е.

$$I_{\Sigma} = \sum_{i=1}^n I_i = \sum_{i=1}^n \frac{U_{\text{вх}i}}{R_i}.$$

Выходное напряжение усилителя $U_{\text{вых}}$ определяется как:
 $U_{\text{вых}} = -I_{\Sigma} R_{\text{oc}}$, тогда с учетом получим:

$$U_{\text{вых}} = -R_{\text{oc}} \sum_{i=1}^n \frac{U_{\text{вх}i}}{R_i}.$$

Как видим выходное напряжение ОУ пропорционально сумме выходных напряжений, но противоположно по знаку.

Повторитель напряжения на основе ОУ. Схема повторителя напряжения может быть получена из схемы не инвертирующего усилителя, если отключить резистор R_1 от общего тока, т. е. $R_1 \rightarrow \infty$. Тогда коэффициент усиления K_y будет равен 1.

Входное сопротивление повторителя определяется входным сопротивлением операционного усилителя и может составлять гигаомы., в случае использования ОУ с большим входным сопротивлением. При необходимости работы повторителя на низкоомную нагрузку, выход ОУ можно подключить к двухтактному эмиттерному повторителю.

Разностный усилитель предназначен для усиления разности двух входных напряжений. Основными недостатками разностного усилителя являются: низкое входное сопротивление и трудность изменения коэффициента усиления из-за необходимости согласования внешних резисторов.

Измерительный усилитель. УстраниТЬ недостатки, присущие разностному усилителю можно, если использовать буферный дифференциальный усилитель, выполненный на двух операционных усилителях, включенных по схеме неинвертирующего усилителя. Выходное дифференциальное напряжение буферного каскада поступает на вход резисторного (дифференциального) усилителя. Общий коэффициент усиления K измерительного усилителя равен: $K = K_b K_p$, где: K_p — коэффициент усиления разностного усилителя, а K_b — коэффициент усиления буферного дифференциального каскада.

Помимо того, что усилитель обладает большим входным сопротивлением по обеим входам, он обладает большим коэффициентом

подавления синфазного входного сигнала. Поэтому он широко применяется в измерительной технике, в частности в медицине, при измерении разности потенциалов в точках тела на фоне больших помех, имеющих синфазный характер.

Генераторы линейно – изменяющегося напряжения используются в блоках осциллографов и телевизоров в качестве сигналов развертки, кроме этого они находят применение при реализации некоторых методов аналого-цифрового преобразования (АЦП), осуществляющих преобразование аналоговых сигналов (например, амплитуды) в цифровой код. Основой генератора линейно – изменяющегося напряжения является ОУ, в цепи отрицательной обратной связи которого, включен конденсатор.

Компараторы это устройства, предназначенные для сравнения двух аналоговых величин (напряжений или токов). На основе компараторов строятся аналогово-цифровые преобразователи, а также амплитудные дискриминаторы и другие устройства. Важной характеристикой компаратора является погрешность Δ_{cp} сравнения. В основном она определяется

напряжением U_{cm} и его температурным дрейфом $\frac{\Delta U_{cm}}{\Delta T^\circ}$. Напряжение смещения усилителя может быть, тем или иным способом, установлено равным нулю, с погрешностью Δ_{iz} измерительного прибора. Таким образом, в случае устранения U_{cm} , погрешность сравнения будет определяться как:

$$\Delta U_{cp} = \Delta U_{iz} + \frac{\Delta U_{cm}}{\Delta T^\circ}.$$

Погрешность ΔU_{cp} расширяет область неопределенности сравнения на величину $\pm \Delta U_{cp}$.

Важной характеристикой компаратора является время задержки срабатывания t_{cp} . Время t_{cp} определяется как интервал времени с момента

подачи на вход компаратора скачка напряжения $U_{\text{вх}}$, до момента, когда выходной сигнал компаратора достигнет значения $0,9 U_{\text{max}}$.

Устройство выборки и хранения (УВХ) используется в основном в аналого-цифровых преобразователях и предназначении для запоминания и хранения мгновенного значения сигнала, представляющего собой изменяющееся во времени напряжение. Основой УВХ является конденсатор, который в определенные моменты времени запоминает мгновенные значения напряжения. Необходимо также отметить, что у конденсаторов существует еще мало изученное явление – диэлектрической памяти. Суть этого явления заключается в том, что если заряженный конденсатор мгновенно разрядить, то напряжение на конденсаторе начнет линейно нарастать от нуля до некоторого значения. Так, например, у конденсатора с диэлектриком из полипропилена, напряжение за время 10^{-2} с возрастет на 0,1 % от того значения, до которого конденсатор был заряжен. Наименьшее значение увеличения напряжения наблюдается у конденсатора с диэлектриком из терлона – 0,01 % за время 10^{-2} с. Из изложенного следует, что к выбору типа конденсатора необходимо относится очень тщательно.

Практические занятия по функциональным устройствам на основе ОУ

1. Исследование схем включения операционных усилителей.
2. Изучение свойств фильтров, усилителей и генераторов собранных на базе операционных усилителей.
3. Моделирование в специализированной программной среде дифференциальных каскадов усилителей мощности.

Цифровая электроника

Элементы алгебры логики. Схемотехника логических элементов

В лекции необходимо рассказать о содержании и методике преподавания в школе начальных сведений по алгебре логики и схемотехнике интегральных логических элементов и необходимых сведений по комбинационным цифровым устройствам. Рассматривается вопрос последовательного перехода от базовых логических элементов, таких как «и», «или» и «отрицание» к более сложным интегральным схемам, таким как «исключающее или», «шифратор», «десифратор», «счетчик», «триггер», «генератор», «цифровой фильтр» и т.д. Вводится понятие логического «нуля» и логической «единицы» с точки зрения уровня входного или выходного напряжения.

Основной задачей лекции является наглядная демонстрация связи лабораторных работ по курсу «цифровая электроника» и практических задач, возникающих в процессе проектной деятельности, с изучаемым материалом алгебры логики на уроках информатики. Решение подобных задач позволяет учащимся улучшить развитие логического мышления, т.к. оно переносится из теоретической плоскости в практическую. Помимо этого, стоит так же отметить тот факт, что разбирая работу типовых логических интегральных схем с учениками, преподаватель прививает им еще один навык, так называемого последовательного мышления. Т.е. когда работа устройства рассматривается не в статическом, установившемся режиме, а последовательно во времени, изменяя внутреннее состояние логических компонентов шаг за шагом. Это дает возможность реально осознать и посмотреть на практике то, что сигнал распространяется с конечной скоростью, обусловленной временем переключения того или иного логического элемента.

Отдельно рассматривается вопрос контроля состояния, как входов, выходов, так и промежуточных контрольных точек. Вводится понятие логического генератора и логического анализатора. Как их заменить обычным генератором и осциллографом, если эти приборы отсутствуют. Так же демонстрируется логический «пробник», который позволяет наглядно измерить логический сигнал в любой точке схемы, представляющей собой индикатор со светодиодом, цвет которого соответствует логическому состоянию «нуля» или «единицы». Так же проводится демонстрация различных других индикаторов, для удобства интерпретации общего состояния изучаемой схемы, например, семисегментный индикатор или точечный светодиодный индикатор.

На лекции необходимо затронуть вопрос моделирования логических схем на компьютере в соответствующем программном обеспечении, что позволяет подготовиться к практическому занятию, провести моделирование различных неисправностей и т.д.

Физически цифровые сигналы представляют собой напряжения, действующие в некой электрической цепи и принимающие два дискретных значения. Когда ключ разомкнут на выходе цепи напряжение будет равно нулю. При замкнутом ключе напряжение на выходе цепи будет равно напряжению питания. Низкий уровень напряжения условно назовем логической «0», а высокий – логический «1».

Если ключ установить соответствующим образом на дверную коробку, то логическая «1» будет нести информацию о том, что дверь закрыта, а логический «0» информирует нас о том, что дверь открыта. В данном случае логическая «1» и логический «0» характеризуют состояние двери и являются для нас сигналами, несущими информацию о состоянии двери. Принято считать, что «1» и «0» представляют единицу информации, которую назвали «бит» - сокращение от английского слова *binary digit* (двоичное число). Если

мы будем наблюдать за состоянием двери и за временем, то в момент времени t_1 мы зафиксируем изменение состояния двери, т. е. некоторое событие. При этом, если произойдет изменение «0» на «1», то это событие информирует нас о том, что дверь закрылась. Изменение «1» на «0» указывает, что в момент времени t_2 произошло событие, информирующее нас о том, что дверь открылась.

Таким образом, изменение состояния, физически представляемое перепадом напряжения, также является цифровым сигналом, информирующим о том, что произошло некое событие.

Кроме перечисленных сигналов, в цифровой электронике есть ещё один вид сигналов, это импульсы напряжения. Как правило, длительность импульсов не является информативным параметром, единицей информации является сам факт появления импульса. Однако, минимальное значение длительности импульса должно быть таким, чтобы цифровые схемы могли должным образом отреагировать на этот импульс.

Если к выходу рассматриваемой цепи подключить вход некоторого цифрового устройства, то принято считать, что на вход ЦУ действует некая логическая переменная A , которая может принимать значения «0» и «1» или представлять изменение состояния, обозначаемое $«0 \rightarrow 1»$ и $«1 \rightarrow 0»$. Отметим, что на выходе любых цифровых устройств всегда формируются только цифровые сигналы, поскольку окончные каскады цифровых устройств представляют собой электронные ключи.

В цифровой электронике числа представляются в виде набора единиц и нулей. Такой набор называется цифровым кодом. Наиболее распространенным кодом в цифровой электронике является двоичный код. Двоичное кодирование базируется на двоичной системе счисления. Под системой счисления принято понимать способ записи чисел цифровыми знаками (цифрами).

Логика в общем смысле — это наука о формах и законах мышления, а математическая логика — это наука о применении математических методов для решения различных логических задач. В цифровой электронике используется главным образом начальный раздел математической логики — исчисление высказываний, или алгебра логики. В иностранной литературе алгебру логики часто называют булевой алгеброй по имени Джорджа Буля, который во второй половине девятнадцатого века разработал многие положения математической логики. Практическое применение математической логики стала находить только в 40-х годах прошлого столетия. К этому времени появились сложные переключательные схемы в автоматических телефонных системах и в вычислительных устройствах, и для расчета этих схем потребовалось привлечь аппарат математической логики. В настоящее время математическая логика широко применяется при проектировании и анализе различных логических схем, а также при описании их работы.

Предметом рассмотрения алгебры логики являются так называемые высказывания. Под высказыванием понимается любое утверждение, о котором можно сказать, что оно является либо истинным, либо ложным. Высказывания оцениваются, только с точки зрения их истинности или ложности. Никакие другие признаки (хорошее высказывание, плохое высказывание и т. д.) в алгебре логики не рассматриваются. Одновременно истинных и ложных высказываний не существует.

Если высказывание истинно, то говорят, что его значение истинности равно единице, если высказывание ложно, то его значение истинности равно нулю. Два высказывания называются эквивалентными, если их значения истинности одинаковы.

Таким образом, значение истинности высказываний — переменная величина, которая может принимать только два дискретных значения: 0

или 1. Высказывания могут быть простыми и сложными. Сложное высказывание получается в результате объединения простых высказываний с помощью так называемых логических связей. Простые высказывания обозначаются начальными буквами латинского алфавита (A, B, C, D), а сложные — конечными (P, Q и т. д.).

Элемент «И» — это логическая схема, реализующая функцию логического умножения. Работу элемента «И» отражает таблица истинности, которая показывает значение переменной P на выходе для любой комбинации значений A и B . Простейшая электрическая схема элемента «И» — схема на двух ключах. Если принять состояние замкнутого ключа за «1», а разомкнутого за «0», то работа схемы полностью описывается таблицей истинности.

Элемент «ИЛИ» — это логическая схема, реализующая функцию логического сложения.

Элемент «НЕ» — это логическая схема реализует функцию логического отрицания или инверсии и называется инвертором.

Необходимо отметить, что к основным логическим элементам часто относят логические элементы, выполняющие функции отрицания логического умножения ($P = A \cdot B$) и отрицания логического сложения ($P = A + B$).

Очевидно, что логика работы основных элементов не нарушится, если логические сигналы, подаваемые на их входы, будут представлять собой импульсы напряжения с соответствующими значениями амплитуды и нулевого уровня.

Основные логические элементы строятся на основе резисторов, диодов и транзисторов. Если в качестве входных и выходных радиоэлементов

используются биполярные транзисторы, то данный логический элемент относится к транзисторно-транзисторной логике.

Логические элементы ТТЛ в настоящее время находят широкое применение, поскольку обладают хорошим быстродействием, высокой помехоустойчивостью, малой стоимостью и удобством применения.

Логические элементы выпускаются в виде цифровых микросхем. Цифровая микросхема представляет собой микроэлектронное изделие, которое выполняет определенную функцию преобразования и обработки сигналов (в частности логическую функцию) и имеет высокую плотность упаковки электрорадиоэлементов. Плотность упаковки — это отношение числа элементов интегральной микросхемы к ее объему.

Цифровые микросхемы выпускаются в виде серий. Серия интегральных микросхем представляет собой ряд интегральных микросхем, которые могут выполнять различные функции, но имеют единое конструктивно-технологическое исполнение и предназначены для совместного использования. Цифровые микросхемы ТТЛ производят по полупроводниковой технологии, т. е. все радиоэлементы выполняются внутри и в приповерхностном слое кристалла, представляющего пластину кремния толщиной $200 \div 300$ мкм и размером от $1,5 \times 1,5$ до 6×6 мм.

Логические элементы КМОП строятся на основе комплементарных (взаимодополняющих) полевых транзисторов со структурой МОП (металл-окисел-полупроводник).

Логические элементы выпускаются в виде цифровых микросхем, выполненных по полупроводниковой технологии.

Цифровые микросхемы КМОП логики обладают целым рядом достоинств, что обуславливает их широкое применение в цифровой

аппаратуре. Основной особенностью данных микросхем является низкое потребление тока в статическом режиме и высокая помехозащищенность.

Основой логических элементов КМОП является двухпозиционный ключ, выполненный на полевых транзисторах с *p*-каналом и *n*-каналом с объединенными стоками.

Рассмотренные нами логические схемы, как ТТЛ, так и КМОП, имеют активный выход, т. е. выход элемента через соответствующие транзисторные ключи всегда подключен или к шине питания, или к шине «земля». Существует ситуация, когда необходимо выходы нескольких логических элементов подключить к одному проводу, например, когда необходимо подключить к однойшине данных несколько задатчиков двоичных кодов. В этом случае в качестве выходных устройств задатчиков кодов используются логические элементы с тремя состояниями. Эти элементы кроме двух активных состояний (лог. «1», лог. «0») имеют третье состояние выхода — обрыв.

Чтобы построить такой элемент, используют двухполлярный ключ на МОП транзисторах, который подключается к выходу обычного логического элемента.

Выходы логических элементов могут использоваться для управления внешней нагрузкой. Внешняя нагрузка может представлять собой: лампочки, светодиоды, обмотки реле и т. д. При решении вопроса согласования выхода логического элемента с внешней нагрузкой необходимо, чтобы значение выходного тока логического элемента не превышало предельно допустимого значения, кроме того не создавалось ситуаций, когда включение нагрузки может привести к повышению напряжения на выходе логического элемента выше допустимого. Элементы ТТЛ лучше работают на отводе тока, чем на отдаче, поэтому внешнюю нагрузку (лампочки, светодиоды, обмотки реле) лучше подключать к напряжению питания. В случае, когда ток нагрузки

меньше предельно допустимого выходного тока логического элемента, нагрузку можно подключить непосредственно на выход элемента.

К основным параметрам цифровых микросхем можно отнести следующие: потребляемая мощность P , среднее время задержки распространения t_{3p} , максимальная частота F тактовых импульсов, напряжение источника питания U_p , уровни логических сигналов на выходе, уровень логической «1» — U^1 , уровень логического нуля — U^0 , нагрузочная способность. Второй и третий параметр характеризуют быстродействие цифровой схемы.

Через $U_{вх_1}$ и $U_{вых_1}$ обозначены уровни входного и выходного напряжений, соответствующие логической «1», а через $U_{вх_0}$ и $U_{вых_0}$ — соответствующие логическому «0». Различают время задержки $t_{3p\ 10}$ распространения при переключении из состояния 1 в состояние 0 и при переключении из состояния 0 в состояние 1 — $t_{3p\ 01}$, а также среднее время задержки распространения t_{3p} , причем $t_{3p} = 0,5(t_{3p\ 10} + t_{3p\ 01})$. Время задержки принято определять по перепадам уровней $0,5\Delta U_{вх}$ и $0,5\Delta U_{вых}$. Максимальная рабочая частота $F_{макс}$ — это частота, при которой сохраняется работоспособность схемы.

Нагрузочная способность характеризуется коэффициентом объединения по входу $K_{об}$ и коэффициентом разветвления по выходу $K_{раз}$ (иногда используется термин «коэффициент объединения по выходу»). Величина $K_{об}$ — это число логических входов, величина $K_{раз}$ — максимальное число однотипных логических элементов, которые могут быть подключены к выходу данного логического элемента. Помехоустойчивость в статическом режиме характеризуют напряжением $U_{пст}$, которое называют статической помехоустойчивостью. Это такое максимально допустимое

напряжение статической помехи на входе, при котором еще не происходит изменений выходных уровней логического элемента.

Практические занятия по алгебре логики и схемотехнике логических элементов

1. Исследование статических параметров основных логических элементов ТТЛ.

2. Исследование динамических параметров элементов «или-не» и «и-не» ТТЛ логики.

Комбинационные цифровые устройства

Логические устройства разделяют на два класса: комбинационные и последовательностные. Устройство называют комбинационным, если его выходные сигналы в некоторый момент времени однозначно определяются входными сигналами, имеющими место в этот момент времени.

В последовательностных устройствах обязательно имеются элементы памяти. Состояние этих элементов зависит от предыстории поступления входных сигналов. Выходные сигналы последовательностных устройств определяются не только сигналами, имеющимися на входах в данный момент времени, но и состоянием элементов памяти. Таким образом, реакция последовательностного устройства на определенные входные сигналы зависит от предыстории его работы.

Среди как комбинационных, так и последовательностных устройств выделяются типовые, наиболее широко используемые на практике.

Преобразователи кодов служат для преобразования одной формы представления чисел в другую. В данном разделе мы рассмотрим комбинационные схемы для преобразования двоичного кода в другие и наоборот.

Преобразователь десятичного кода в двоичный код. Такой преобразователь называют шифратором или «кодером» и используют, например, для перевода десятичных чисел, на клавиатуре пульта управления в двоичный код. Шифратор имеет десять входов и, на которые поступают переменные $X_1, X_2, X_3, \dots, X_{10}$. Эти переменные могут принимать значения «0» или «1». При этом предполагается, что сигнал соответствующий логической «1» в каждый момент времени подается только на один из входов. На четырех выходах шифратора формируется выходной двоичный код, соответствующий десятичному числу, представленным сигналом логической «1» на соответствующем входе.

Преобразователь двоичного кода в семисегментный код. Данные преобразователи кода используются для построения узлов индукции. В настоящее время в качестве элементов индукции десятичных чисел используются семисегментные индикаторы, построенные на основе светодиодов или жидкокристаллических кристаллов.

Мультиплексоры. При разработке различных цифровых устройств, часто возникает задача передачи цифровой информации, поступающей по нескольким входам на один выход. Цифровые устройства, выполняющие эту операцию называются мультиплексорами. Мультиплексоры обозначают через MUX (от англ. *Multiplexor*), а также через MS (от англ. *Multiplexor selector*) можно изобразить в виде коммутатора, обеспечивающего подключение одного из нескольких входов (их называют информационными) к одному выходу устройства. Кроме информационных входов в мультиплексоре имеются адресные входы и, как правило, разрешающие (стробирующие). Сигналы на адресных входах определяют, какой конкретно информационный канал подключен к выходу. Если между числом информационных входов n и числом адресных входов m действует

соотношение $n = 2^m$, то такой мультиплексор называют полным. Если $n < 2^m$, то мультиплексор называют неполным.

Разрешающие входы используют для расширения функциональных возможностей мультиплексора. Они используются для наращивания разрядности мультиплексора, синхронизации его работы с работой других узлов. Сигналы на разрешающих входах могут разрешать, а могут и запрещать подключение определенного входа к выходу, т. е. могут блокировать действие всего устройства.

Демультиплексоры в функциональном отношении противоположны мультиплексорам. Здесь сигналы с одного информационного входа распределяются в желаемой последовательности по нескольким выходам. Выбор нужной выходной шины, как и в мультиплексоре, обеспечивается кодом на адресных входах. При m адресных входах демультиплексор может иметь в зависимости от конструкции до 2^m выходов.

По принципу действия мультиплексоры КМОП существенно отличаются от подобных устройств ТТЛ. В функциональном отношении между ними также существуют различия. Поскольку коммутация осуществляется при помощи управляемых вентильных ключей, проводящих в обоих направлениях, эта разновидность приборов с равным успехом может применяться в качестве мультиплексора и демультиплексора.

Сопротивление открытых вентильных ключей невелико (примерно 80 Ом) и мало зависит от проходящего сигнала. Такие ключи хорошо проводят аналоговые и импульсные сигналы. Разомкнутые ключи обеспечивают практически полный разрыв цепи, так как токи утечки ничтожно малы (не более 1 нА).

Когда на соответствующем входе микросхемы отсутствует разрешающий сигнал, все коммутируемые цепи разомкнуты, благодаря чему

эту категорию приборов можно использовать с другими, имеющими три выходных состояния.

Подобно прочим приборам КМОП они рассеивают очень малую статическую мощность независимо от состояния управляемых ключей.

Цифровые компараторы выполняют сравнение двух чисел, заданных в двоичном коде. Они могут определять равенство двух двоичных чисел A и B с одинаковым количеством разрядов либо вид неравенства $A > B$ или $A < B$, поэтому, цифровые компараторы имеют три выхода. Схема одноразрядного компаратора представляет собой структуру логического элемента «исключающее ИЛИ-НЕ».

Практические занятия по комбинационным цифровым устройствам

1. Сборка и исследование комбинационных логических схем «и/или-не», «исключающие или» на основе элементов «и-не», «или-не» 155 серий.
2. Разработка, сборка и исследование приоритетного шифратора чисел 1,2,3,4 с индикацией состояния.
3. Разработка, сборка и исследование дешифратора трехразрядного двоичного кода в десятичный код.

Последовательностные цифровые устройства

Триггеры — это с одной стороны простейшие, а с другой стороны важнейшие устройства, на основе которого строятся все последовательные функциональные схемы цифровой электроники. Электронный триггер (англ. *trigger*), спусковое устройство с двумя устойчивыми состояниями, в которых он может находиться произвольно долго – до воздействия на него внешнего сигнала. Триггер был придуман для регистрации неких событий, представленных электрическими сигналами.

Электрический сигнал действует на входе триггера в течение некоторого интервала времени t_c . В момент возникновения входного сигнала, выходной сигнал триггера должен измениться, например, перейти из состояния лог. «0» в состояние лог. «1», и оставаться в этом состоянии произвольно долго, не зависимо от того продолжает ли действовать на его входе сигнал или нет. Вот основное требование к схеме триггера. Второе требование заключается в том, что мы должны иметь возможность устанавливать триггер в исходное состояние. Чтобы выполнить первое требование, достаточно использовать некий двухходовой элемент с эквивалентными по своему действию входами, и соединить его выход со вторым входом. В качестве такого элемента может быть использована логическая схема «ИЛИ».

В отличие от асинхронных триггеров, тактируемые триггеры могут срабатывать только в определенные моменты времени, задаваемыми тактовыми импульсами. В этом случае R и S входы можно рассматривать как информационные, а состояние триггера либо изменяется, либо нет, в зависимости от того какие сигналы действуют на информационных входах в момент действия тактового импульса. Тактируемые триггеры подразделяются на триггеры со статическим и динамическим управлением. Изменение состояния триггеров с статическим управлением может происходить на протяжении всего отрезка времени действия тактового импульса. Изменение состояния триггеров с динамическим управлением может происходить только в момент формирования переднего или заднего фронта тактового импульса.

В отличие от RS – триггера D – триггер имеет только один информационный вход D , на котором может присутствовать сигнал лог. «1» или лог. «0». По переднему или заднему фронту тактового импульса D – триггер переходит в состояние, соответствующее состоянию D входа. Хотя с помощью D – триггера невозможно зарегистрировать сигнал на

информационном входе в момент времени его появления, D – триггер находит широкое применение в цифровой электронике.

По принципу действия JK – триггер аналогичен D – триггеру, но имеет два информационных входа J и K . Если на входы J и K поступают противоположные сигналы, то на очередном фронте тактового импульса выход Q воспроизводит значение J входа. Если оба входа имеют низкий уровень, то состояние выхода не изменяется. Если на обоих входах высокий уровень, то триггер работает в счетном режиме. Часто JK – триггера имеют асинхронные установочные RS входы.

Одной из наиболее важных функций цифровой электроники является счет. Эту функцию выполняют счетчики импульсов. Микрооперация счета заключается в изменении числа в счетчике на 1. Этую операцию невозможно выполнить без устройств, обладающих «памятью». Таким устройством является триггер, поэтому все счетчик строятся на триггерах. Основной параметр счетчика – модуль счета. Это минимальное число единичных сигналов, которое может быть сосчитано счетчиком. Информация о значении числа подсчитанных импульсов представляется счетчиком в виде n -разрядного двоичного или двоично-десятичного кода. Существует много разновидностей счетчиков, отличающихся как по своему функциональному назначению, так и по способу формирования внутренних связей.

Назначение регистров — хранение и преобразование многоразрядных двоичных чисел. Регистры наряду со счетчиками и запоминающими устройствами являются наиболее распространенными последовательностными устройствами цифровой техники. При простоте схемы регистры обладают большими функциональными возможностями. Они используются в качестве управляющих и запоминающих устройств, генераторов и преобразователей кодов, счетчиков, делителей частоты, узлов временной задержки.

Элементами структуры регистров являются синхронные триггеры D-типа либо $RS(JK)$ - типа с динамическим или статическим управлением. Как отмечалось, одиночный триггер может запоминать (регистрировать) один разряд (бит) двоичной информации. Такой триггер можно считать одноразрядным регистром. Цифровая техника, как правило, оперирует с многоразрядными числами. Поэтому в качестве регистров в зависимости от назначения используются наборы либо цепочки триггеров — по количеству разрядов числа. В схемы регистров входят также комбинационные элементы, роль которых в данном случае вспомогательная.

Занесение информации в регистр называют операцией ввода или записи. Выдача информации к внешним устройствам характеризует операцию вывода или считывания.

Все регистры в зависимости от функциональных свойств подразделяются на две категории: накопительные (регистры памяти, хранения) и сдвигающие.

В свою очередь, сдвигающие регистры делятся:

- по способу ввода и вывода информации на параллельные, последовательные и комбинированные (параллельно-последовательные и последовательно-параллельные);
- по направлению передачи (сдвига) информации на однонаправленные и реверсивные.

Регистры хранения — простейший вид регистров. Их назначение — хранить двоичную информацию небольшого объема в течение короткого промежутка времени. Эти регистры представляют собой набор синхронных триггеров, каждый из которых хранит один разряд двоичного числа. Ввод (запись) и вывод (считывание) информации производится одновременно во всех разрядах параллельным кодом, Ввод обеспечивается тактовым

командным импульсом. С приходом очередного тактового импульса происходит обновление записанной информации.

Регистры сдвига, помимо операции хранения, осуществляют преобразование последовательного двоичного кода в параллельный, а параллельного — в последовательный, выполняют арифметические и логические операции, служат в качестве цифровых элементов временной задержки.

Своим названием они обязаны характерной для этих устройств операции сдвига. Сущность сдвига состоит в том, что с приходом каждого тактового импульса происходит перезапись (сдвиг) содержимого триггера каждого разряда в соседний разряд без изменения порядка следования единиц и нулей.

При сдвиге информации вправо после каждого тактового импульса бит из более старшего разряда сдвигается в младший, а при сдвиге влево — наоборот.

Практические занятия по последовательностным устройствам

1. Сборка и исследование R-S триггера на логических элементах «и-не» и «или-не» 155 серии.
2. Изучение записи и чтения данных в статические запоминающие устройства.
3. Изучение постоянных запоминающих устройств.
4. Программирование ПЛИС.

Цифро-анalogовые и аналого-цифровые преобразователи

Цифро-анalogовые и аналого-цифровые преобразователи являются «звеном» между аналоговыми и цифровыми устройствами. Хотя

электронные АЦП и ЦАП были изобретены сравнительно недавно, сами процессы преобразования аналоговой величины в цифровую и цифровой в аналоговую известны уже давно, с тех пор, когда были изобретены первые меры веса и длины. Собственно измерения веса тела или длины представляют собой процесс преобразования аналоговой величины в именованное число. Для реализации процесса аналого-цифрового преобразования, например, измерения веса тела, требуется набор единичных мер веса (гирек) и устройство сравнения, с помощью которого устанавливается соответствие между измеряемым весом тела и числом единичных мер веса, уравновешивающих вес тела. При измерении длины предмета с помощью линейки тоже необходим набор единичных мер длины и устройство сравнения (наш глаз), позволяющий оценить между какими по счету штрихами на линейке находится конец измеряемого предмета.

При измерении веса тела, когда на чашу весов устанавливаются меры веса, производится цифро-аналоговое преобразование, т. е. на чаше весов формируются все, составленные из необходимых, числа единичных мер веса. Электронные АЦП и ЦАП оперируют с такими физическими величинами, как напряжение и ток, т. е. фактически при АЦ – преобразовании «взвешивается» напряжение, а при ЦА – преобразовании формируется напряжение (ток), значение которого соответствует задаваемому числу единичных мер напряжения или тока. В настоящее время существует много различных типов ЦАП и АЦП, используемых в электронном приборостроении. В данной главе мы рассмотрим принципы построения некоторых из них, наиболее распространенных в различной электронной аппаратуре.

В основном ЦАП производят преобразование числа, представленного двоичным кодом, в эквивалентный ему ток или напряжение. В этом случае наиболее удобно для построения ЦАП использовать набор источников тока, «взвешенных» по двоичному закону, т. е. также как «взвешены» разряды

двоичного кода. Выходной ток (напряжение), эквивалентное преобразуемому коду, получают путем суммирования на выходной шине токов тех источников, у которых в соответствующем разряде входного кода стоит 1. Подключение весовых токов на выходную шину производится с помощью переходных ключей, управляемых сигналами, действующими на соответствующих разрядных шинах.

Аналого-цифровой преобразователь (АЦП) – это устройство, осуществляющее преобразование аналоговой величины в цифровой код. В настоящее время существуют различные способы АЦ – преобразования и реализующие их АЦП, однако, все они имеют, в некотором смысле, общий алгоритм преобразования аналоговой величины, например, напряжения, в цифровой код. Этот алгоритм предусматривает формирование тем или иным способом некого эквивалентного напряжения и выполнение с операцией сравнения, формируемого напряжения и преобразуемого. По результатам сравнения принимается решение о эквивалентности сформированного и преобразуемого напряжений. После чего процесс преобразования заканчивается. Сформированное эквивалентное напряжение содержит в себе целое число единичных мер напряжения. Это число и является цифровым эквивалентом (цифровым кодом) преобразуемого напряжения.

Процесс аналого-цифрового преобразования происходит в течение некоторого интервала времени, который называется временем преобразования $T_{\text{пр}}$. Точность преобразования и время преобразования, в некотором смысле, связаны между собой. Повышение точности преобразования влечет увеличение времени преобразования. Поэтому выбор способа преобразования, в каждом конкретном случае использования АЦП, всегда основан на определенном компромиссе между требуемой точностью и быстродействием.

Практические занятия по ЦАП и АЦП

1. Исследование работы АЦП последовательного приближения.
2. Исследование работы АЦП двойного интегрирования.
3. Исследование работы сигма-дельта АЦП.

СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Страшкевич А. И. Аналоговая электроника. Учебное пособие для элективного курса. — М., 2007
2. Страшкевич А. И. Цифровая электроника. Учебное пособие для элективного курса. — М., 2007
3. Волович Г. И. Схемотехника аналоговых и аналого-цифровых электронных устройств. — М.: Издательский дом «Додэка-XXI», 2005.
4. Хоровиц П., Хилл У. Искусство схемотехники в 3-х томах. Издание 4-е, переработанное и дополненное. — М.: Мир, 1993.
5. Грушвицкий Р. И., Мурсаев А. Х., Угрюмов Е. П. Проектирование систем на микросхемах программируемой логики. — СПб.: БХВ-Петербург, 2006.
6. Бессонов В. В. Энциклопедия юного радиолюбителя-конструктора. — М.: Солон-Р, 2001.
7. Бессонов В. В. Электроника для начинающих и не только. — М.: Солон-Р, 2001.
8. Борисов В. Г. Энциклопедия юного радиолюбителя-конструктора. — М.: Солон-Р, 2001.
9. Борисов В. Г. Введение в цифровую технику. — М.: Радио и связь, 1987.
10. Иванов Б.С. Осциллограф ваш помощник. — М.: МП «Символ-Р», 1991.
11. Новаченко И.В. Микросхемы для бытовой аппаратуры. — М.: Радио и связь, 1999.

12. Пономарев Л.Д., Евсеев А.Н. Конструкции юных радиолюбителей. — М.: Радио и связь, 1989.
13. Уитсон Дж. 500 практических схем на ИС. — М.: Мир, 1992.
14. Фромберг Э.М. Конструкция на элементах цифровой техники. — М.: Радио и связь, 1991.
15. Шелестов И.П. Радиолюбителям. Полезные схемы. — М.: Солон-Р, 2001.
16. Шило В. Л. Популярные цифровые микросхемы. Справочник. — Челябинск: Металлургия, 1988.
17. Шишков А. Первые шаги в радиоэлектронике / Пер. с болг. — София, 1986.
18. Титце У., Шенк К. Полупроводниковая схемотехника: Справочное руководство. Пер. с нем. — М.: Мир, 1982.
19. Преснухин А.Н., Воробьев Н.В., Шинкевич А.А. Расчет элементов цифровых устройств. — М.: Высш. шк., 1991.
20. Угрюмов Е.П. Цифровая схемотехника. — СПб.: БХВ-Санкт-Петербург, 2000.
21. Партала О.Н. Цифровая электроника. — СПб.: Наука и техника, 2000.
22. Опадчий Ю.Ф. и др. Аналоговая и цифровая электроника. — М.: Горячая линия – Телеком, 2000.
23. Пейтон А., Волш В. Аналоговая электроника на операционных усилителях. — М.: БИНОМ, 1994.
24. Костиков В.Г. Источники электропитания электронных средств. — М.: Радио и связь, 1998.
25. Березин О.К. и др. Источники электропитания электронной аппаратуры. — М.: «Три Л», Горячая линия – Телеком, 2000.

Руководитель мероприятия

М.П.Романов