

Основы электроники

КУРС ЛЕКЦИЙ

ЧУ ПО «СОЦИАЛЬНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ КОЛЛЕДЖ»

ПРЕПОДАВАТЕЛЬ: БОРИСОВ АЛЕКСЕЙ АЛЬБЕРТОВИЧ

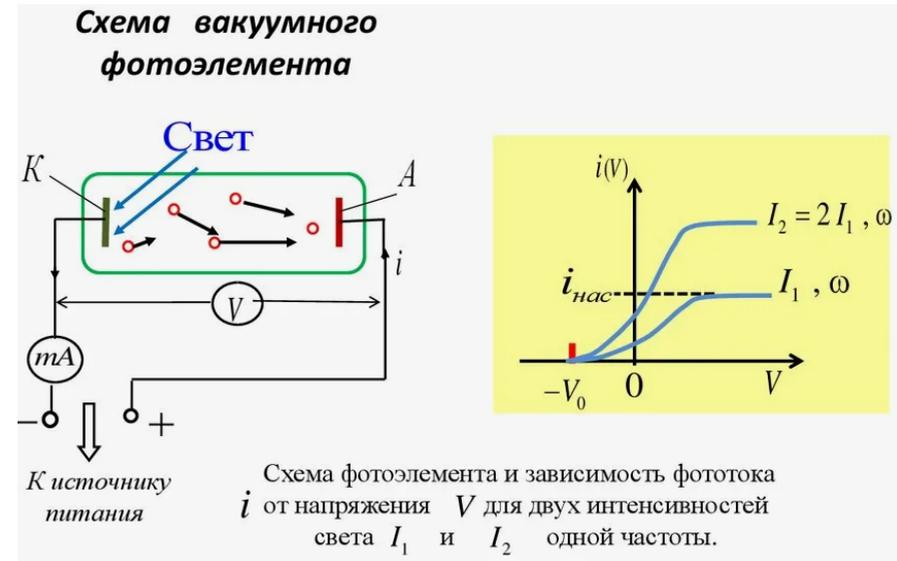
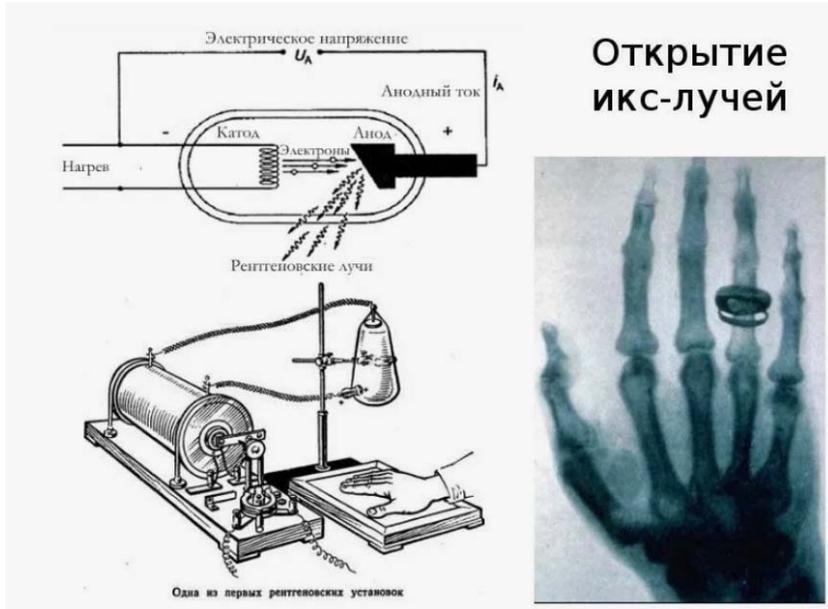
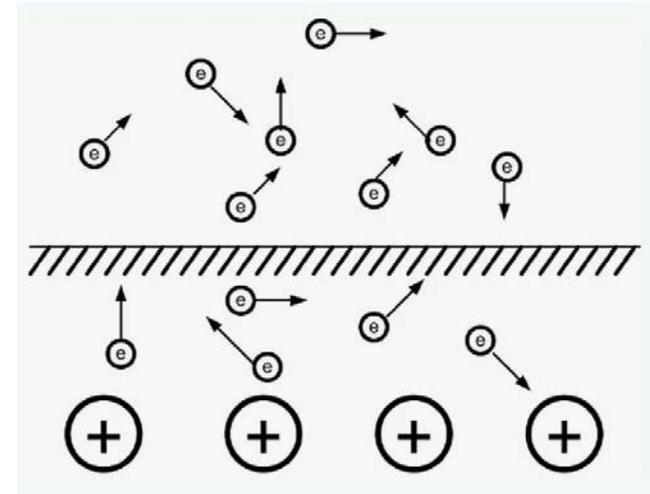
Электроника

1. История
2. Области электроники
3. Твердотельная электроника
4. Основные полупроводниковые элементы
5. Основные пассивные элементы
6. Аналоговая и цифровая электроника
7. Электрический ток
- 7.

История

Электроника зародилась в начале XX века после создания:

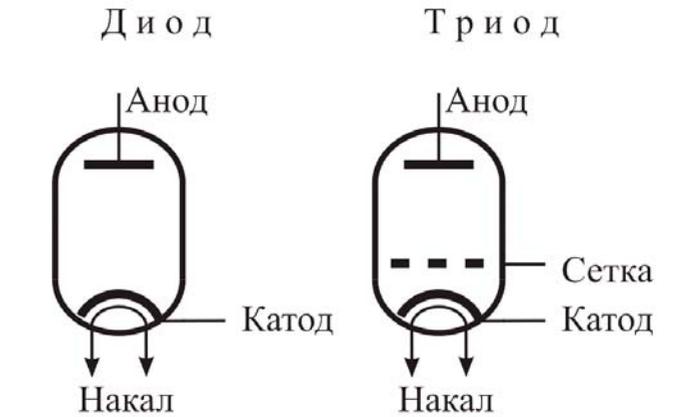
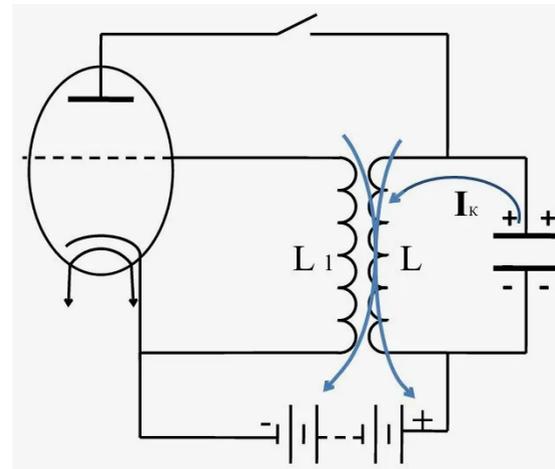
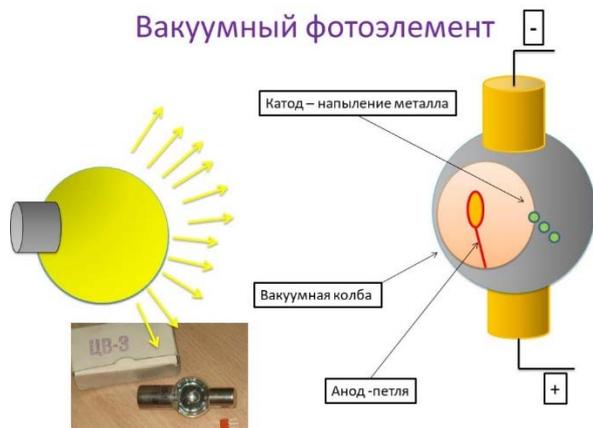
- основ электродинамики (1856-73 г.г.),
- исследования термоэлектронной эмиссии (1882-1901 г.г.),
- фотоэлектронной эмиссии (1887-1905 г.г.),
- рентгеновских лучей (1895-97 г.г.),
- открытия электрона (Дж. Томсон, 1897 г.),
- создания электронной теории (1892-1909 г.г.).



История

Развитие электроники началось с изобретения:

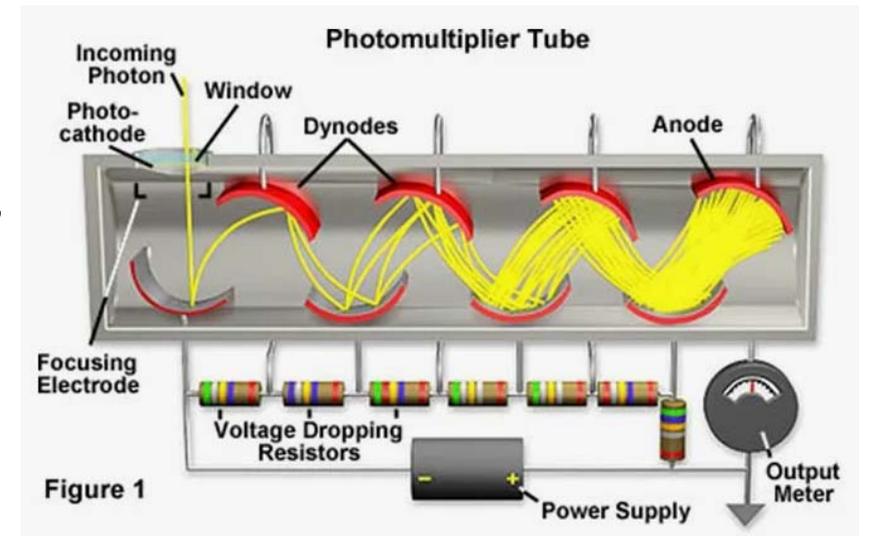
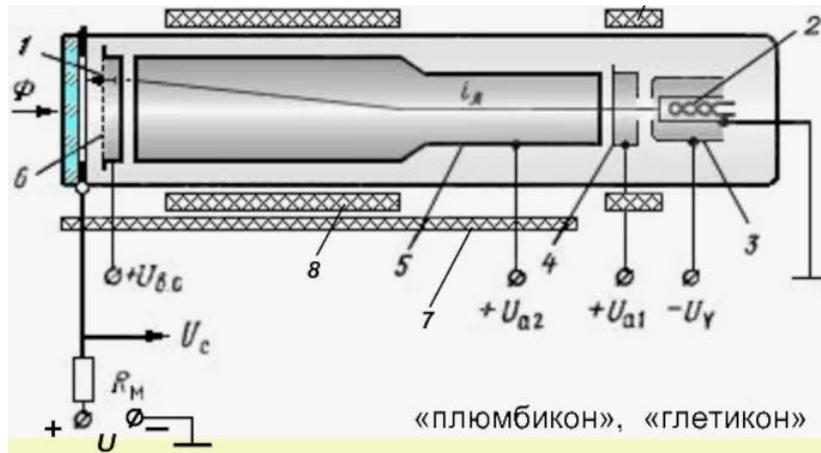
- лампового диода (Дж. А. Флеминг, 1904 г.);
- трехэлектродной лампы – триода (Л. Де Форест, 1906 г.);
- использования триода для генерирования электрических колебаний (нем. инж. А. Мейснер, 1913 г.);
- разработки мощных генераторных ламп с водяным охлаждением (М.А. Бонч-Бруевич, 1919-25 г.г.) для радиопередатчиков.
- Вакуумные фотоэлементы (А.Г. Столетов, 1888 г., пром. образец – нем. ученые Ю. Эльстер и Г. Хейтель, 1910 г.),



История

Развитие электроники :

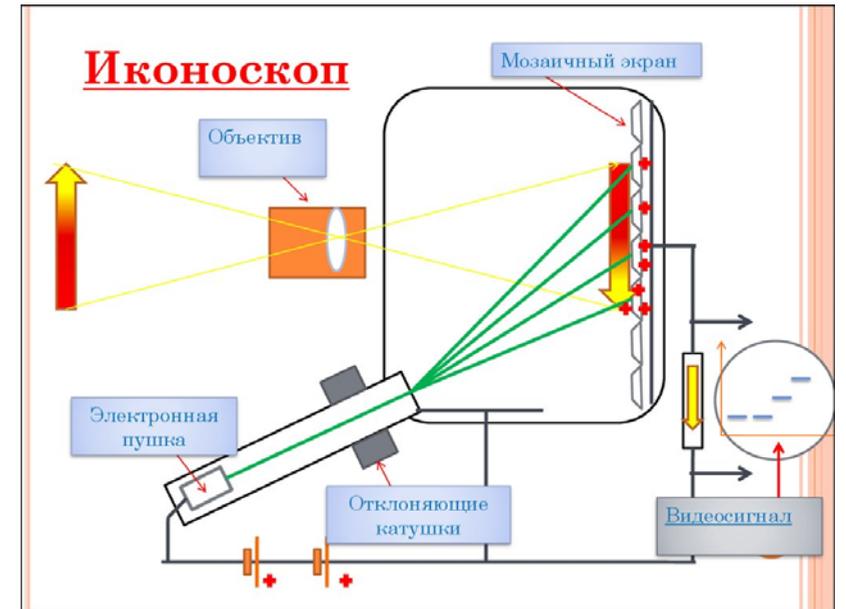
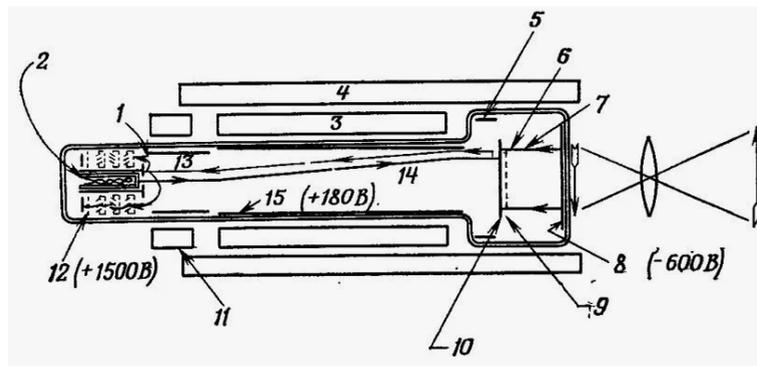
- фотоэлектронные умножители – однокаскадные (П.В. Тимофеев, 1928 г.)
- многокаскадные (Л.А. Кубецкий, 1930 г.) – позволили создать звуковое кино, послужили основой для разработки передающих телевизионных трубок:
- видикона (идея предложена в 1925 г. А.А. Чернышевым),



История

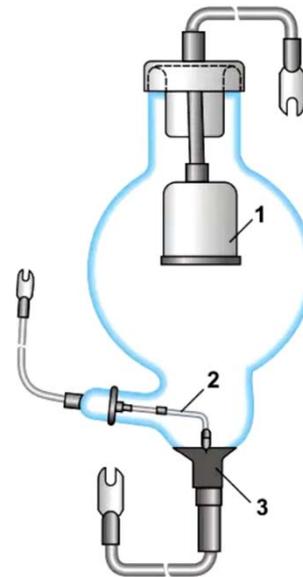
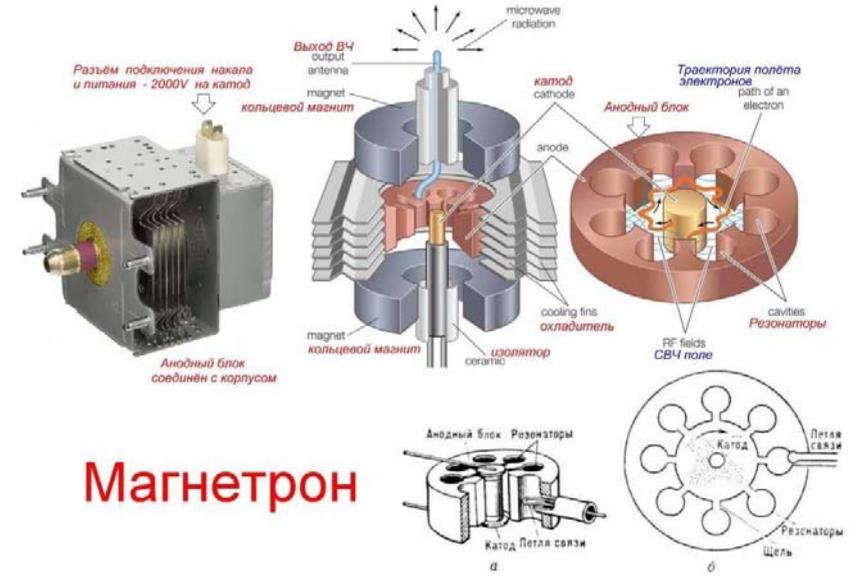
Развитие электроники :

- иконоскопа (С.И. Катаев, независимо от него В.К. Зворыкин, 1931-32 г.),
- супериконоскопа (П.В. Тимофеев, П.В. Шмаков, 1933 г.),
- суперортикона (двухсторонняя мишень для такой трубки была предложена сов. ученым Г.В. Брауде в 1939 г., впервые суперортикон описан амер. учеными А. Розе, П. Веймером и Х. Лоу в 1946 г.) и др.



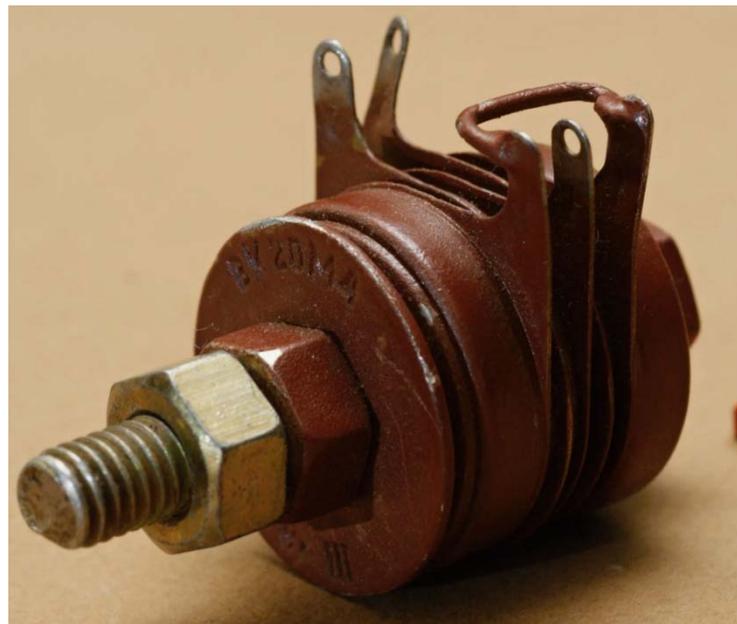
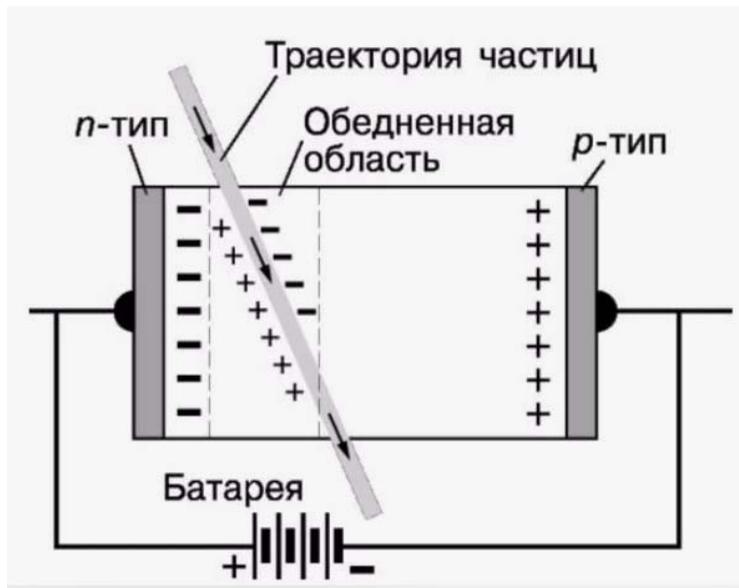
История

- Создание многорезонаторного магнетрона (Н.Ф. Алексеев и Д.Е. Маляров под рук. М.А. Бонч-Бруевича, 1936-37 г.г.).
- Одновременно с разработкой вакуумных электронных приборов создавались и совершенствовались газоразрядные приборы (ионные приборы), например,
 - ртутные вентили,
 - тиратроны,
 - газоразрядные источники света.



История

- Использование кристаллических полупроводников в качестве детекторов для радиоприемных устройств (1900-1905 г.г.),
- создание купроксных и селеновых выпрямителей тока и фотоэлементов (1920-1926 г.г.),



СЕЛЕНОВЫЕ ВЫПРЯМИТЕЛИ

Подкладка из никелированной стали

Селен (полупроводник)

Натодный слой из висмута, олова и донора кадмия

Прямой ток

p-слой селена, обладает дырочной проводимостью

Свободные дырки

Свободные электроны

p-n переход (запирающий слой)

n-слой надмиевого селена, обладает электронной проводимостью

СХЕМА ДЕЙСТВИЯ СЕЛЕНОВОГО ВЫПРЯМИТЕЛЯ в прямом направлении

Никелированная сталь (анод - 1 мм)

Селен

Натодный слой (0,01 мм)

Прямой ток

Выпрямительная селеновая шайба

Вольтамперная характеристика селенового выпрямителя при 20°C

Селеновая шайба

Латунный зажим

Изоляция

Пружинная латунная шайба

Изоляционная шайба

Запирающий слой (10 мкм)

Натодный слой (6,0 мкм)

Идмиевый селен

Схематический разрез выпрямительной шайбы

ВЫПРЯМИТЕЛЬНЫЙ СТОЛ ИЗ ЧЕТЫРЕХ СЕЛЕНОВЫХ ШАЙБ диаметром 100 мм, собранный по мостовой схеме, на 16 В, 3 а ($U_{p1} = 16$ в; $U_{2,11} = 18$ в; $U_{a1} = \sqrt{2} U_{p1} = 25$ в)

Выпрямитель типа ВСД-4 на 120, 240 в, 2 а

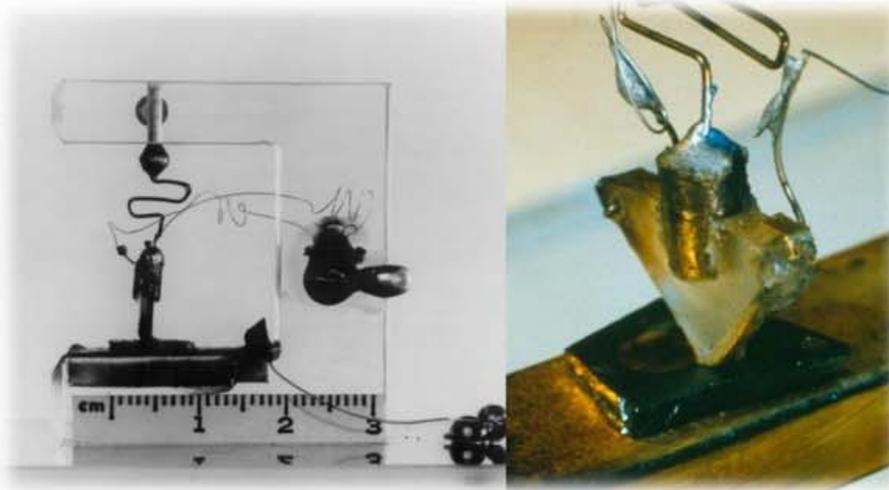
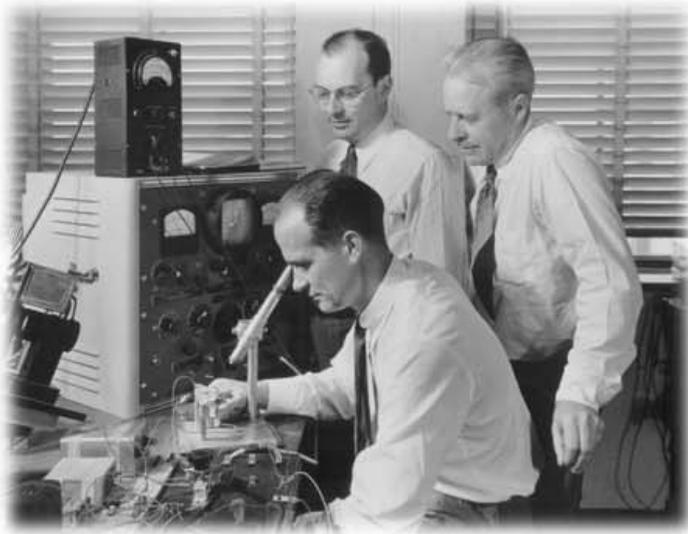
Выпрямительный селеновый стол из 20 шайб, собранный по мостовой схеме, на 80 вольт выпрямленного напряжения (в плече 5 последовательно соединенных шайб по 16 вольт на шайбу)

Выпрямитель типа ВСД-111 на 80 в, 8 а

Селеновые выпрямители получили широкое распространение в силовых установках благодаря высокому к.п.д. (85%) по сравнению с купроксными (55%) и лучшим эксплуатационным качеством

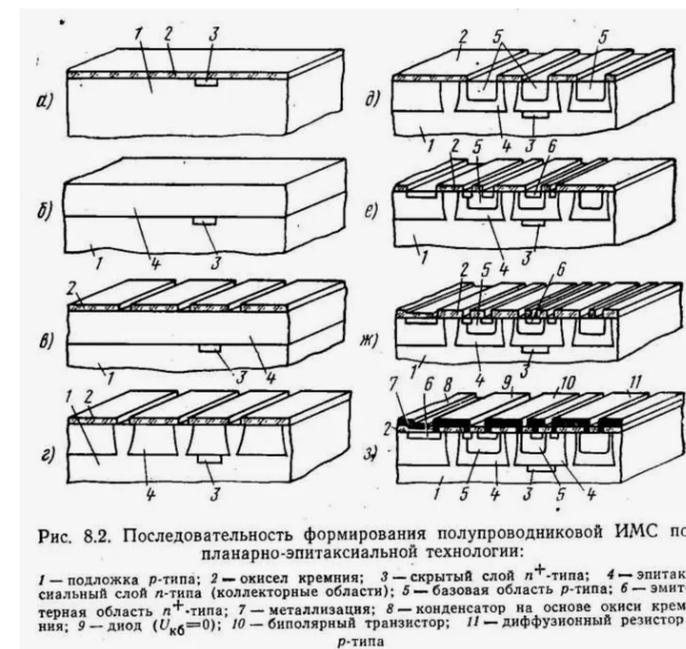
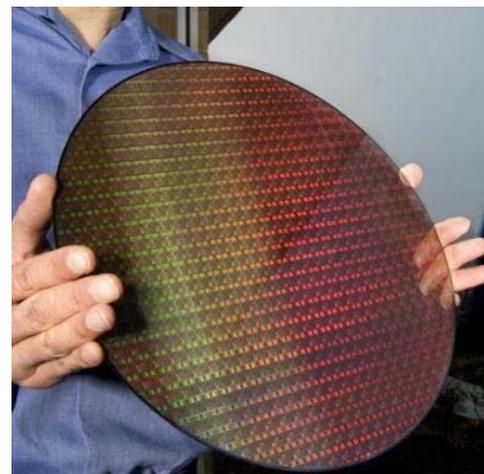
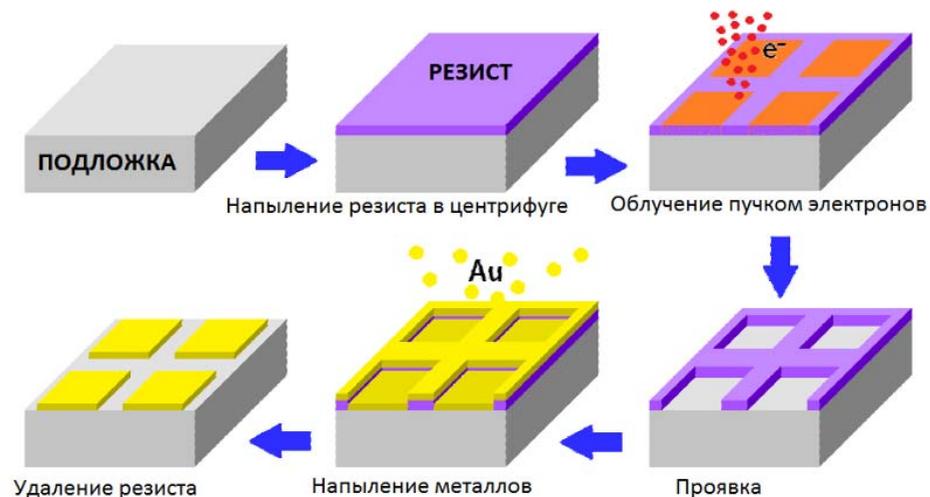
История

- изобретение кристадина (О.В. Лосев, 1922 г.),
 - изобретение транзистора (У. Шокли, У. Браттейн, Дж. Бардин, 1948 г.)
- определили становление и развитие полупроводниковой электротехники.



История

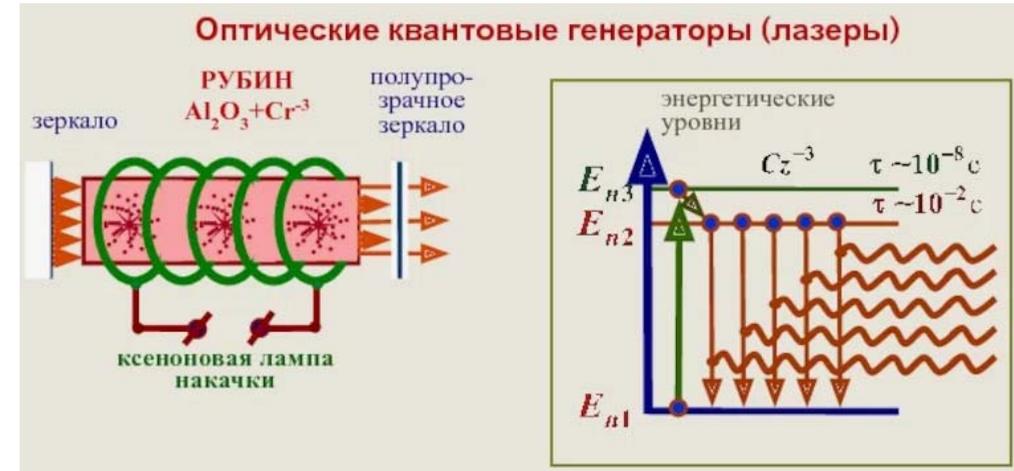
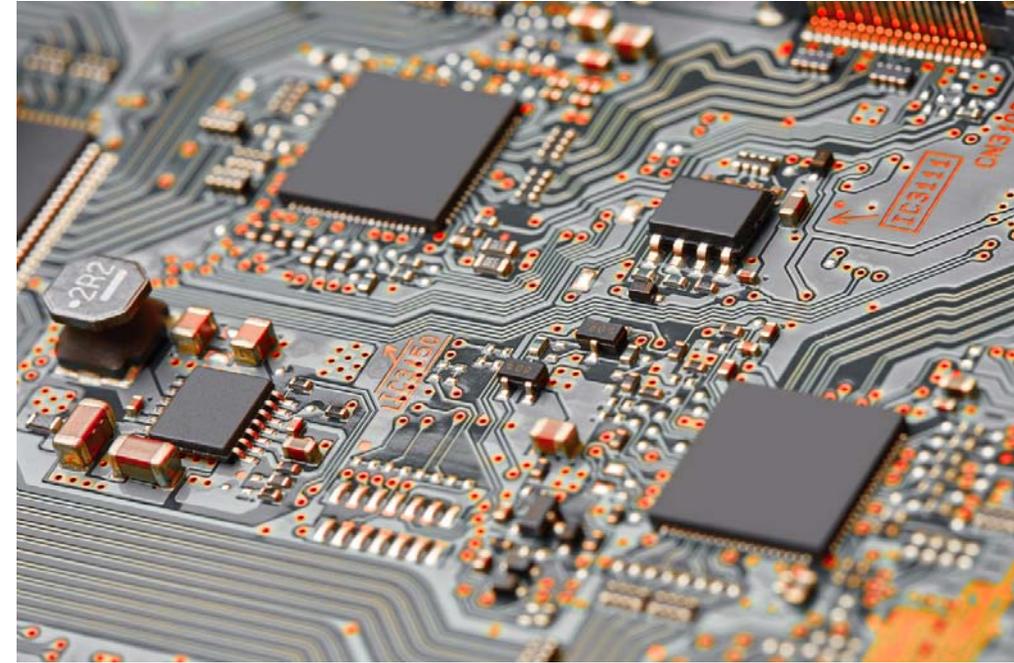
• Разработка планарной технологии полупроводниковых структур (конец 50-х, начало 60-х г.г.) и методов интеграции многих элементарных приборов (транзисторов, диодов, конденсаторов, резисторов) на одной монокристаллической полупроводниковой пластине привело к созданию нового направления – микроэлектроники. Основные разработки в области интегральной электроники направлены на создание интегральных схем – микроминиатюрных электронных устройств (усилителей, преобразователей, процессоров ЭВМ, электронных запоминающих устройств и т. п.), состоящих из сотен и тысяч электронных элементов, размещаемых на одном полупроводниковом кристалле площадью в несколько мм².



История

- Микроэлектроника открыла новые возможности для решения таких проблем, как автоматизация управления технологическими процессами, обработка информации, совершенствование вычислительной техники и других, выдвигаемых развитием современного производства.
- Создание квантовых генераторов (Н.Г. Басов, А.М. Прохоров и независимо от них Ч. Таунс, 1955 г.) – приборов квантовой электроники – определило качественно новые возможности электроники, связанные с использованием источников мощного когерентного излучения оптического диапазона (лазеров) и построением сверхточных квантовых стандартов частоты.

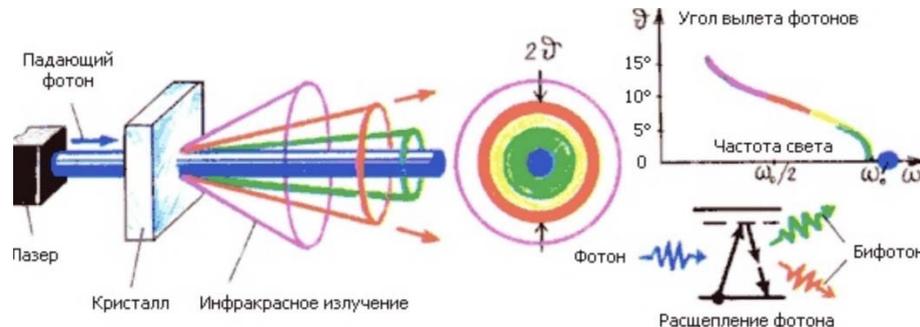
Фундаментальные исследования в области физики и технологии электронных приборов выполнили М.А. Бонч-Бруевич, Л.И. Мандельштамм, Н.Д. Папалекси, С.А. Векшинский, А.А. Чернышев, М.М. Богословский и многие другие.



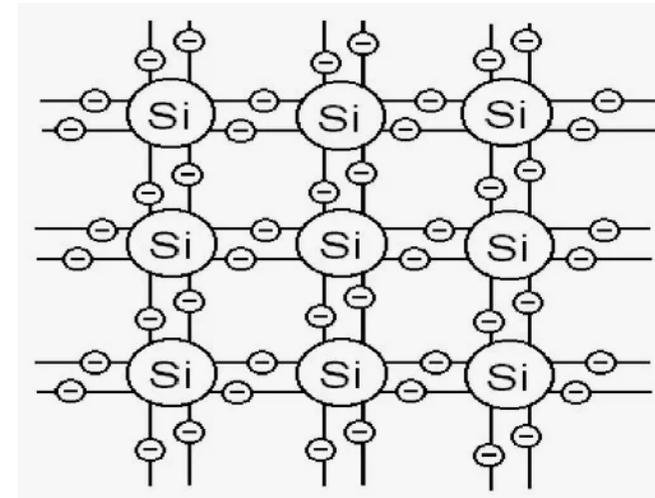
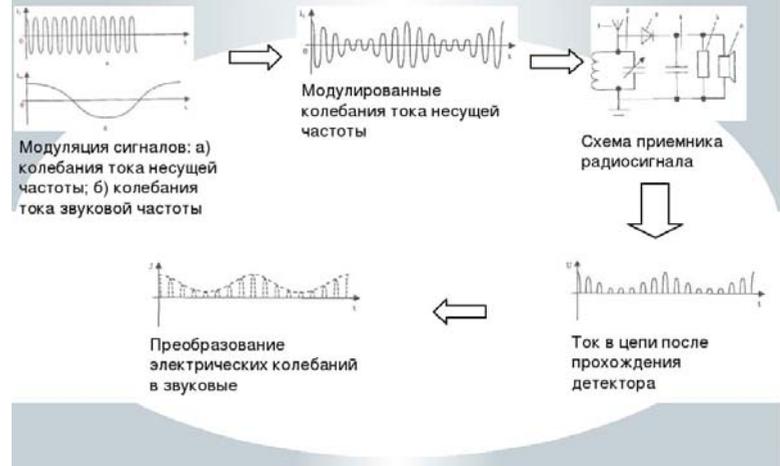
История

По проблемам:

- возбуждения и преобразования электрических колебаний,
- излучения, распространения и приема радиоволн, их взаимодействия с носителями тока в вакууме, газах и твердых телах работали Б.А. Введенский, В.Д. Калмыков, А.Л. Минц, А.А. Расплетин, М.В. Шулейкин и др.
- В области физики полупроводников – А.Ф.Иоффе,
- люминесценции и по др. разделам физической оптики – С.И. Вавилов,
- квантовой теории рассеяния света излучения, фотоэффекта в металлах – И.Е. Тамм и многие другие.



Излучение и прием электромагнитных волн. Принципы радиосвязи



Области электроники

Можно различать следующие области электроники:

- **Физика** (микромира, полупроводников, электромагнитных волн, магнетизма, электрического тока и др.) — область науки, в которой изучаются процессы, происходящие с заряженными частицами,
- **Бытовая электроника** — бытовые электронные приборы и устройства, в которых используется электрическое напряжение, электрический ток, электрическое поле или электромагнитные волны. (Например телевизор, мобильный телефон, утюг, лампочка, электроплита и др.).
- **Энергетика** — выработка, транспортировка и потребление электроэнергии, электроприборы высокой мощности (например электродвигатель, электростанция), электрическая система отопления, линия электропередачи.
- **Микроэлектроника** — электронные устройства, в которых в качестве активных элементов используются микросхемы:
 - **Оптоэлектроника** — устройства в которых используются электрический ток и потоки фотонов,
 - **Аудио-видеотехника** — устройства усиления и преобразования звука и видео изображений,
 - **Цифровая микроэлектроника** — устройства на микропроцессорах или логических микросхемах. Например: электронный калькулятор, компьютер, цифровой телевизор, мобильный телефон, принтер, робот, панель управления промышленным оборудованием, средствами транспорта, и другие бытовые и промышленные устройства.

Электронное устройство может включать в себя самые разные материалы и среды, где происходит обработка электрического сигнала с использованием разных физических процессов. Но в любом устройстве обязательно имеется электрическая цепь.

Области исследований

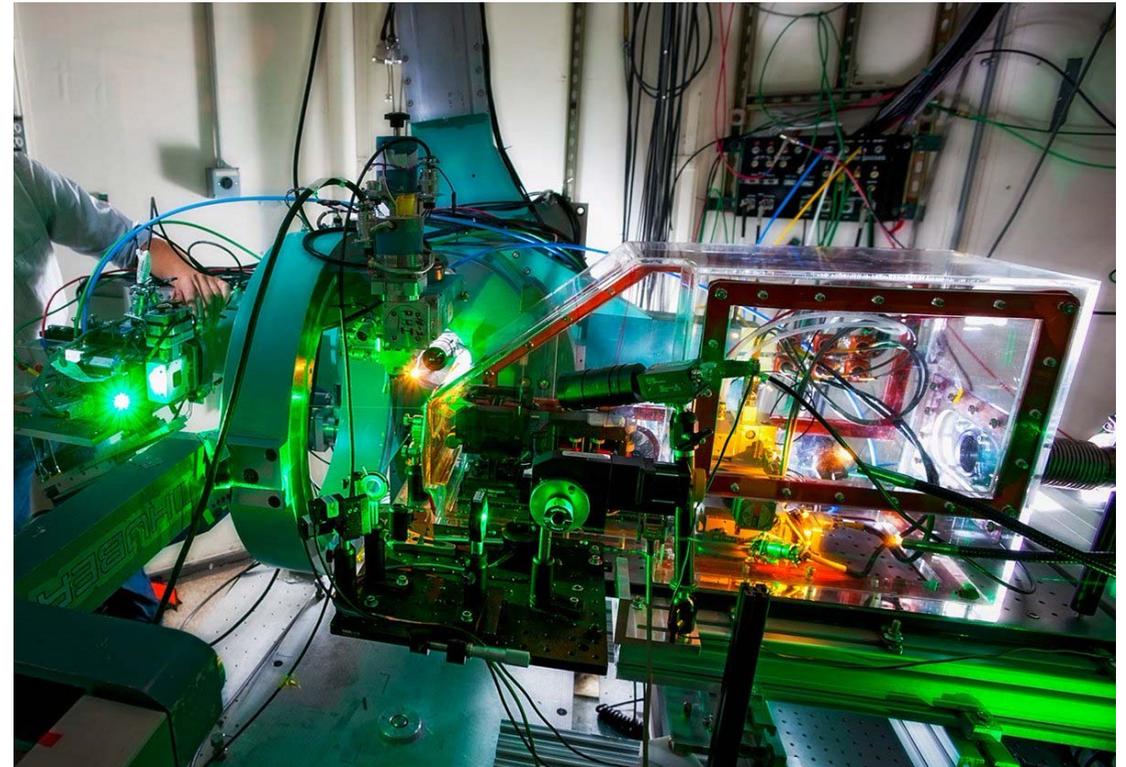
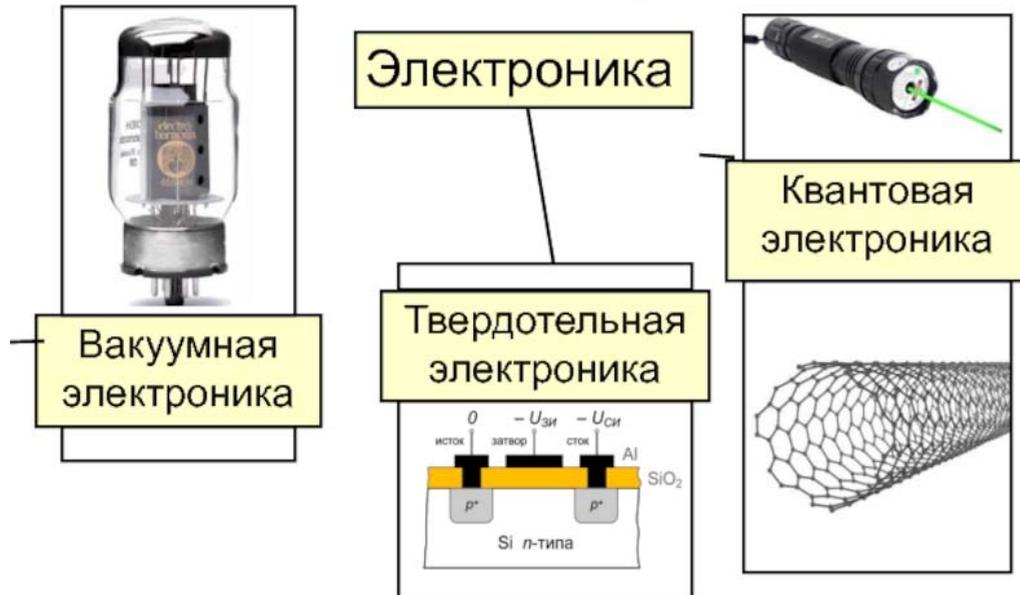
Электроника включает в себя три области исследований:

- *Вакуумную электронику;*
- *Твердотельную электронику;*
- *Квантовую электронику.*

Каждая область подразделяется на ряд разделов и ряд направлений.



Области электроники



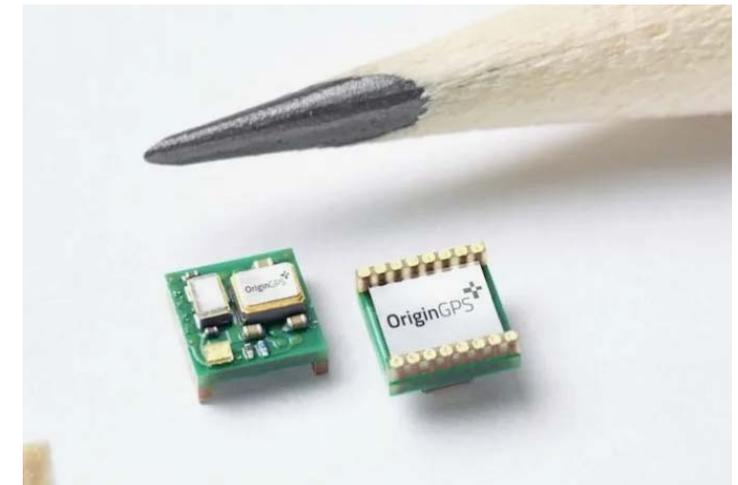
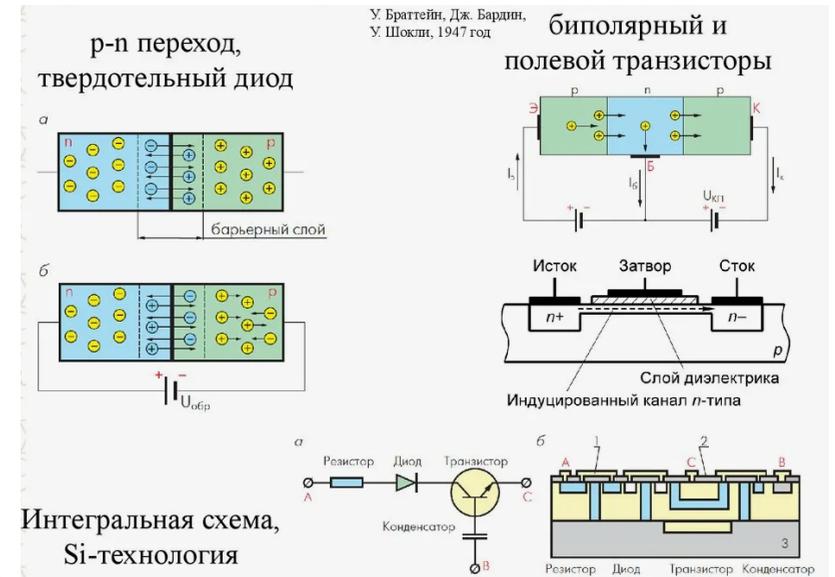
Твердотельная электроника

История твердотельной электроники

Термин твердотельная электроника появился в литературе в середине XX века для обозначения устройств на полупроводниковой элементной базе: транзисторах и полупроводниковых диодах, заменивших громоздкие низкоэффективные электровакуумные приборы — радиолампы. Корень «твёрд» использован здесь, потому что процесс управления электрическим током происходит в твёрдом теле полупроводника в отличие от вакуума, как это происходило в электронной радиолampe. Позднее, в конце XX века этот термин потерял своё значение и постепенно вышел из употребления, поскольку практически вся электроника начала использовать исключительно полупроводниковую твердотельную активную элементную базу.

Миниатюризация устройств

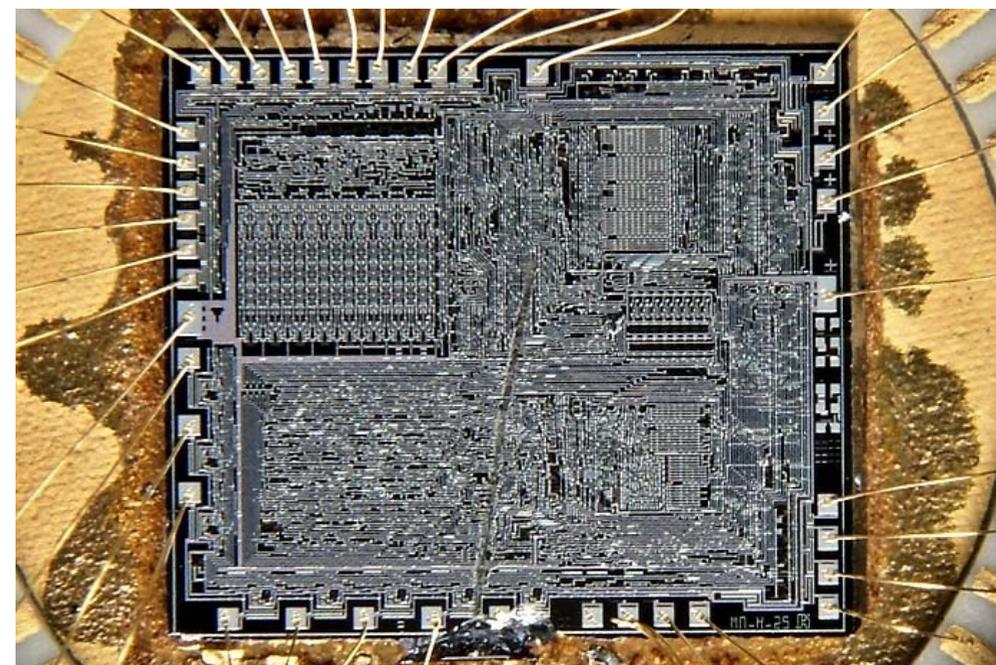
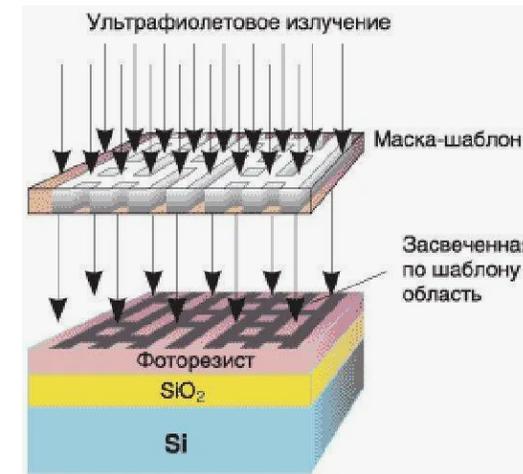
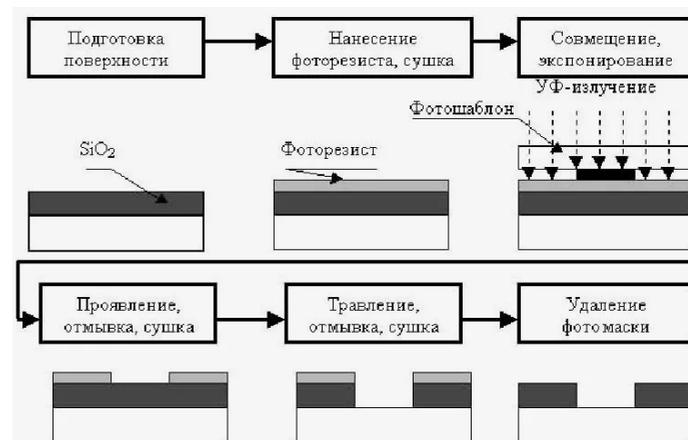
С рождением твердотельной электроники начался революционно быстрый процесс миниатюризации электронных приборов. За несколько десятков лет активные элементы очень сильно уменьшились: если размеры ламп составляли несколько сантиметров, размеры современных интегрированных на полупроводниковом чипе транзисторов составляют десятки нанометров. Современные интегральные микросхемы могут содержать несколько миллиардов таких транзисторов.



Технология получения элементов

Активные и пассивные элементы в твердотельной электронике создаются на однородном сверхчистом кристалле полупроводника, чаще всего кремния, методом инъекции или напыления новых слоев в определённых координатах тела кристалла атомов иных химических элементов, молекул более сложных, в том числе и органических веществ. Инжекция меняет свойства полупроводника в месте инъекции (легирования) меняя его проводимость на обратную, создавая таким образом диод или транзистор или пассивный элемент: резистор, проводник, конденсатор или катушку индуктивности, изолятор, теплоотводящий элемент и другие структуры. В последние годы широко распространилась технология производства источников света на кристалле.

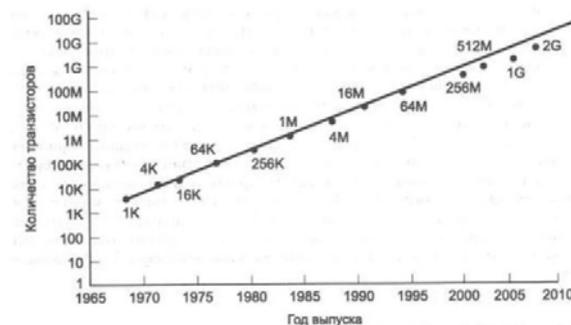
Технологию получения полупроводниковых кристаллов, чистота которых позволяет создавать элементы размером в несколько нанометров, стали называть нанотехнологией, а раздел электроники — микроэлектроникой.



Технология получения элементов

Миниатюризация электронных схем сопровождалась ростом быстродействия устройств. Так первые цифровые устройства ТТЛ технологии требовали микросекунды на переключение из одного состояния в другое и потребляли большой ток, требовавший специальных мер для отвода тепла. В начале XXI века эволюция твердотельной электроники в направлении миниатюризации элементов постепенно приостановилась и в настоящее время практически остановлена. Эта остановка была предопределена достижением минимально возможных размеров транзисторов, проводников и других элементов на кристалле полупроводника ещё способных отводить выделяемое при протекании тока тепло и не разрушаться. Эти размеры достигли единиц нанометров и поэтому технология изготовления микрочипов называется нанотехнологией. Следующим этапом в эволюции электроники возможно станет оптоэлектроника, в которой несущим элементом выступит фотон, значительно более подвижный, менее инерционный чем электрон/«дырка» в полупроводнике твердотельной электроники.

Закон Мура
(закон технологического прогресса)



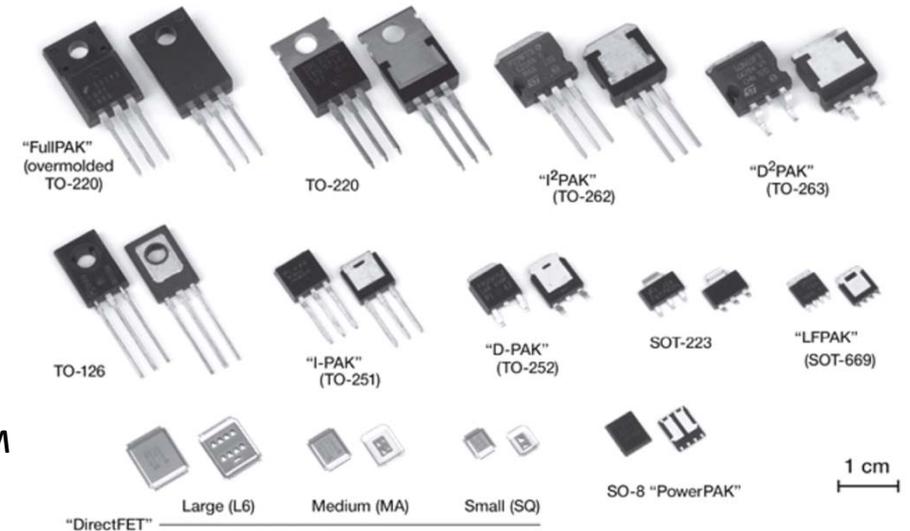
Закон Мура: число транзисторов на одной микросхеме удваивается каждые 18 месяцев, т.е. увеличивается на 60 % каждый год.
Точки на графике – объем памяти в битах.



Основные полупроводниковые элементы

Основные твердотельные активные полупроводниковые приборы, используемые в электронных устройствах:

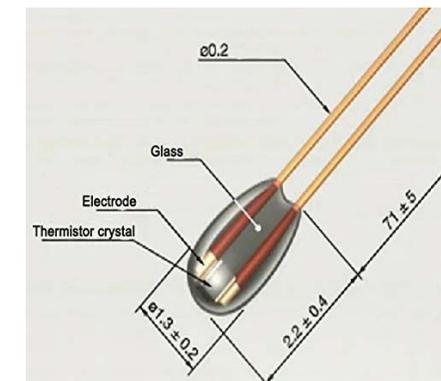
- **Диод** — проводник с односторонней проводимостью от анода к катоду. Разновидности: туннельный диод, лавинно-пролётный диод, диод Ганна, диод Шоттки и др.;
- **Биполярные транзисторы** — транзисторы с двумя физическими р-п-переходами, ток Коллектор-Эмиттер которого управляется током База-Эмиттер;
- **Полевой транзистор** — транзистор, ток Исток-Сток которого управляется Напряжением на р-п- или п-р-переходе Затвор-Сток или потенциалом на нём в транзисторах без физического перехода — с затвором, гальванически изолированным от канала Сток-Исток;
- **Диоды с управляемой проводимостью** динисторы и тиристоры, используемые как переключатели, светодиоды и фотодиоды используемые как преобразователи э/м излучения в электрические сигналы или электрическую энергию или обратно;
- **Интегральная микросхема** — комбинация активных и пассивных твердотельных элементов на одном или нескольких кристаллах в одном корпусе, используемые как модуль, электронная схема в аналоговой и цифровой микроэлектронике.



Основные пассивные элементы

Основные пассивные элементы, используемые в электронных устройствах:

- **Постоянные и переменные резисторы** — элемент, обладающий определённым постоянным или переменным значением электрического сопротивления, предназначенный для линейного преобразования силы тока в напряжение и напряжения в силу тока;
- **Нелинейные резисторы, датчики** — элементы у которых сопротивление зависит от воздействия внешней среды;
- **Конденсаторы** — электронный компонент, представляющий собой двухполюсник с постоянным или переменным значением ёмкости и малой проводимостью; устройство для накопления заряда и энергии электрического поля;
- **Ёмкостные датчики** — элементы у которых ёмкость зависит от воздействия внешней среды;
- **Дроссели** — элемент из проволоки, намотанной поверх магнито-проводного материала;
- **Трансформаторы** — элемент из нескольких отдельных слоев проволоки, намотанных поверх магнито-проводного материала.



Основные различия аналоговой и цифровой электроники

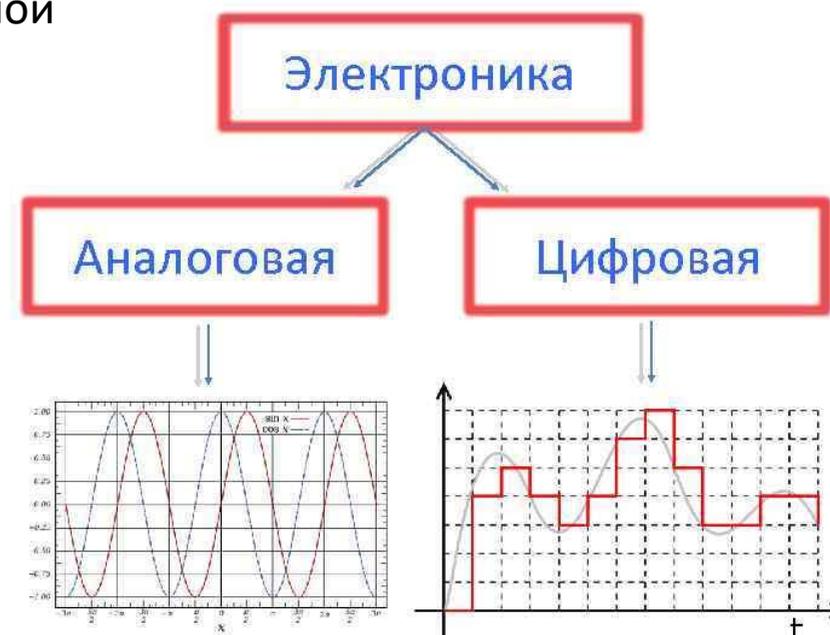
Поскольку в аналоговых и цифровых схемах информация кодируется по-разному, у них отличаются и процессы обработки сигналов. При этом все операции, которые могут быть совершены над аналоговым сигналом могут быть осуществлены и методами цифровой электроники и программного моделирования в микропроцессорах.

- **Аналоговая электроника** использует простейшее пропорциональное одномерное кодирование — отражение физических параметров источника информации в аналогичные физические параметры электрического поля или напряжения (амплитуды в амплитуды, частоты в частоты, фазы в фазы и т. д.).

- **Цифровая электроника** использует n-мерное кодирование физических параметров источника данных.

Минимально в цифровой электронике используется двумерное кодирование: напряжение (ток) и моменты времени. Данная избыточность принята исключительно для гарантированной передачи данных с любым программируемым уровнем добавленных в устройстве шумов и искажений в исходный сигнал. В более сложных цифровых схемах используются методы программной микропроцессорной обработки информации. Методы цифровой передачи данных позволяют реально создавать физические каналы передачи данных абсолютно без потерь (без возрастания шумов и других искажений)

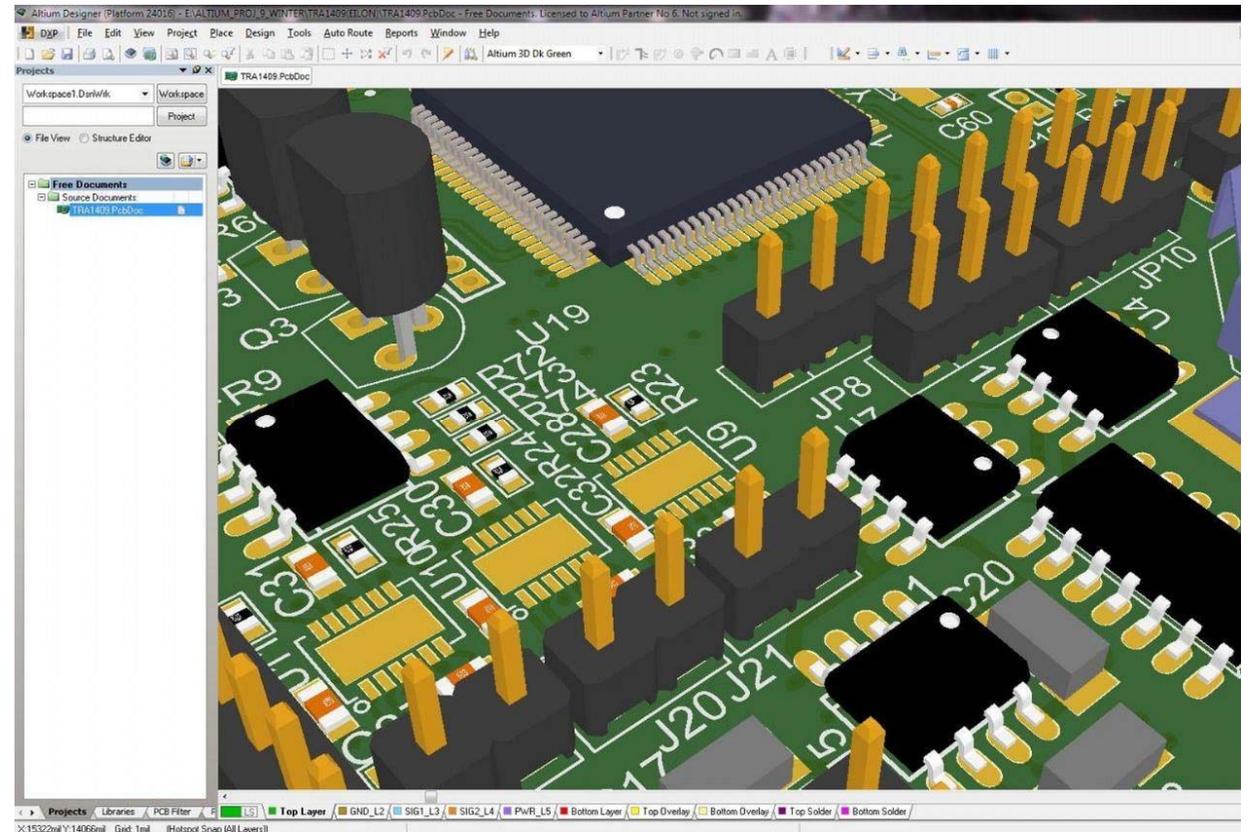
- В физическом же смысле поведение всякой цифровой электронной схемы и всего устройства ничем не отличается от поведения аналогового электронного устройства или схемы и может быть описано теорией и правилами, описывающими функционирование аналоговых электронных устройств.



Сложность разработки

Аналоговые схемы сложнее разрабатывать, нежели сравнимые с ними цифровые; это одна из причин, по которым цифровые системы приобрели большее распространение, нежели аналоговые. Аналоговая схема разрабатывается вручную, и процесс её создания обеспечивает меньше возможностей для автоматизации. Для взаимодействия с окружающей средой в той или иной форме цифровое электронное устройство нуждается в аналоговом интерфейсе. К примеру, у цифрового радиоприёмника имеется аналоговый предусилитель, который является первым звеном приёмной цепи.

Электронные схемы и их составляющие могут быть разделены на два ключевых типа в зависимости от общих принципов их функционирования: аналоговые (непрерывные) и цифровые (дискретные). Одно и то же устройство может состоять как из схем одного типа, так и из смешения обоих типов в той или иной пропорции.



Аналоговые схемы

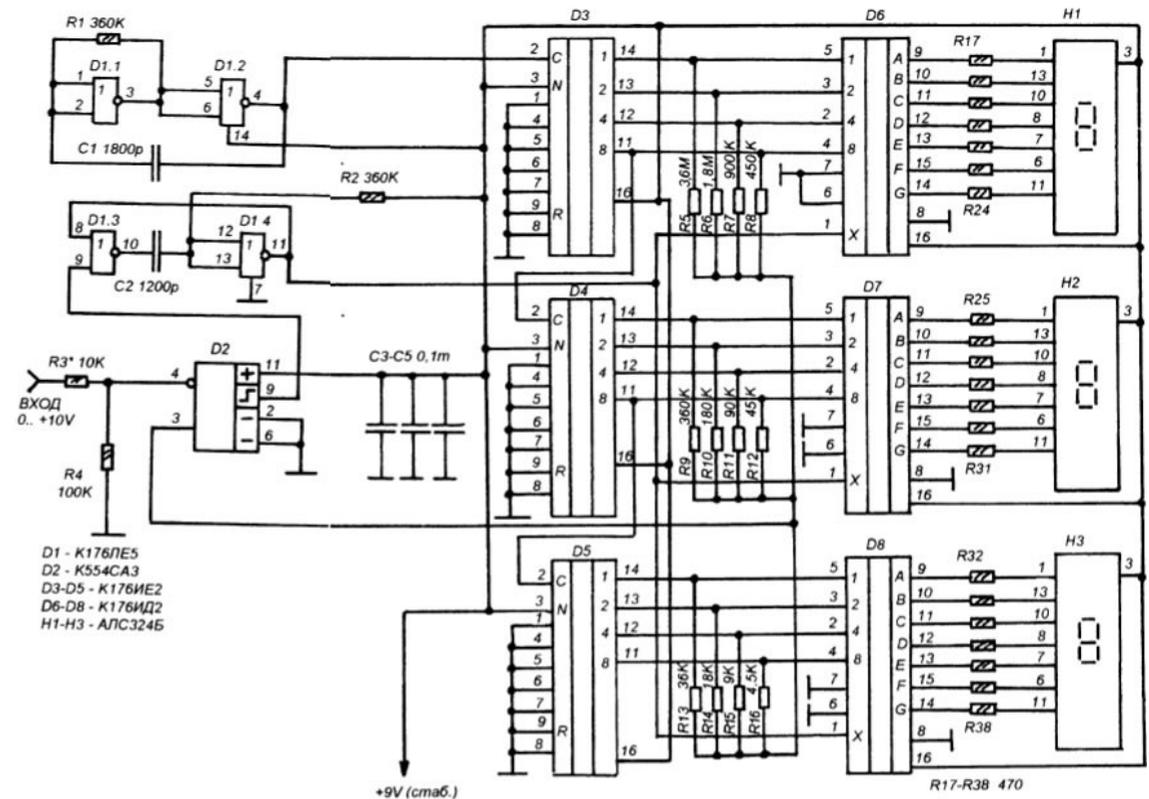
В основном аналоговые электронные приборы и устройства (радиоприёмники, например) конструктивно представляют собой сочетание нескольких разновидностей базовых схем. В аналоговых цепях используется непрерывный диапазон напряжения, в противоположность дискретным уровням, которые применяются в цифровых схемах. На данный момент разработано существенное количество разнообразных аналоговых контуров — в особенности их число велико в силу того, что под «схемой» можно понимать многое: от единственного компонента до целой системы, состоящей из тысяч элементов. Аналоговые схемы ещё называют иногда линейными (хотя в некоторых их видах — преобразователях, к примеру, или модуляторах, — используются и многие нелинейные эффекты). В качестве характерных примеров аналоговых контуров можно назвать электронные лампы и транзисторные усилители, операционные усилители и осцилляторы.

В настоящее время сложно найти такую электронную схему, которая была бы полностью аналоговой. Сейчас в аналоговых цепях используются цифровые или даже микропроцессорные технологии, позволяющие увеличить их производительность. Такая схема обычно называется не аналоговой или цифровой, а смешанной. В некоторых случаях провести чёткое разграничение между непрерывными и дискретными схемами сложно — в силу того, что как те, так и другие включают в свой состав элементы и линейного, и нелинейного характера. Примером может послужить, допустим, компаратор: получая на входе непрерывный диапазон напряжения, он в то же время выдает на выходе лишь один из двух возможных уровней сигнала, подобно цифровой схеме. Похожим образом перегруженный транзисторный усилитель может приобрести свойства контролируемого переключателя, также имеющего два уровня выходного сигнала.

Цифровые схемы

К цифровым относятся схемы, основанные на двух или более количестве дискретных уровней напряжения. Они представляют собой наиболее типичную физическую реализацию булевой алгебры и составляют элементную основу всех цифровых компьютеров. Термины «цифровая схема», «цифровая система» и «логическая схема» часто при этом рассматриваются как синонимичные. Для цифровых схем характерна, как правило, двоичная система с двумя уровнями напряжения, которые соответствуют логическому нулю и логической единице соответственно.

Часто первый соотносится с низким напряжением, а вторая — с высоким, хотя встречаются и обратные варианты. Изучались также и тернарные логические схемы (то есть с тремя возможными состояниями), предпринимались попытки построения компьютеров на их основе. Помимо вычислительных машин, цифровые схемы составляют основу электронных часов и программируемых логических контроллеров (используемых для управления промышленными процессами); ещё одним примером могут служить цифровые сигнальные процессоры.

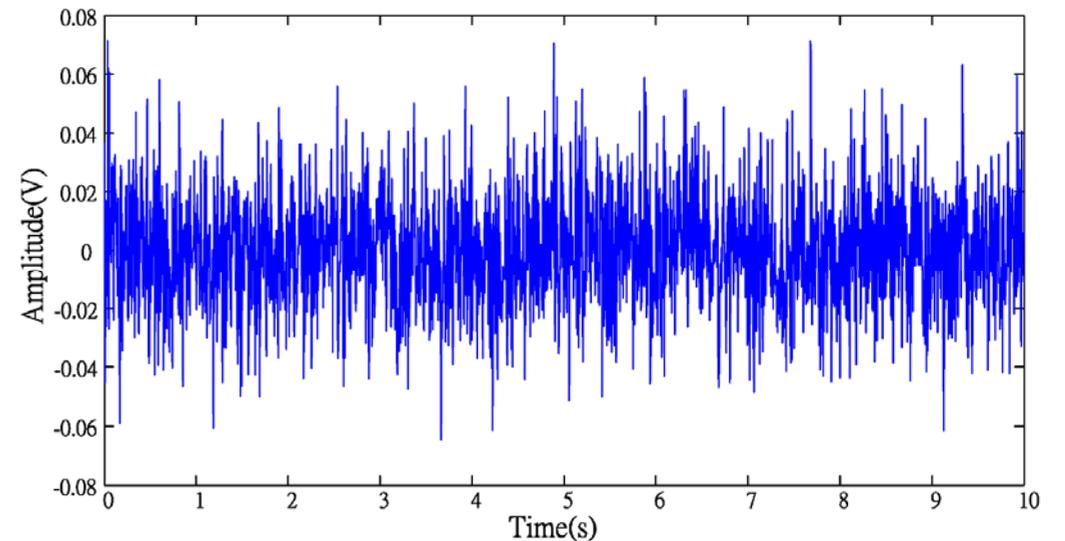


Шум

В соответствии со способом кодирования информации в аналоговых схемах они в существенно большей степени уязвимы для воздействия шума, нежели цифровые цепи. Малое изменение сигнала может внести значительные модификации в передаваемую информацию и в конечном счёте привести к её утрате; в свою очередь, цифровые сигналы принимают лишь одно из двух возможных значений, и для того, чтобы вызвать ошибку, помеха должна составлять примерно половину их общей величины. Это свойство цифровых схем может быть использовано для повышения устойчивости сигналов к помехам. Кроме того, противодействие шуму обеспечивается средствами восстановления сигналов на каждом логическом вентиле, которые уменьшают или ликвидируют помехи; такой механизм становится возможным благодаря квантованию цифровых сигналов. До тех пор, пока сигнал остаётся в пределах определённого диапазона значений, он ассоциируется с одной и той же информацией.

Шум является одним из ключевых факторов, влияющих на точность сигнала; в основном это шум, присутствующий в исходном сигнале, и помехи, вносимые при его передаче.

Фундаментальные физические ограничения — к примеру, т. н. «дробовой» шум в компонентах — устанавливают пределы разрешения аналоговых сигналов. В цифровой электронике дополнительная точность обеспечивается использованием вспомогательных разрядов, характеризующих сигнал; их количество зависит от производительности аналого-цифрового преобразователя (АЦП).



Надёжность электронных устройств

Надёжность электронных устройств складывается из надёжности самого устройства и надёжности источника питания. Надёжность самого электронного устройства складывается из надёжности элементов, надёжности соединений, надёжности схемы и др. Графически надёжность электронных устройств отображается кривой отказов (зависимость числа отказов от времени эксплуатации). Типовая кривая отказов имеет три участка с разным наклоном. На первом участке число отказов уменьшается, на втором участке число отказов стабилизируется и почти постоянно до третьего участка, на третьем участке число отказов постоянно растёт до полной непригодности эксплуатации устройства.



Пример расчета надёжности электронного устройства

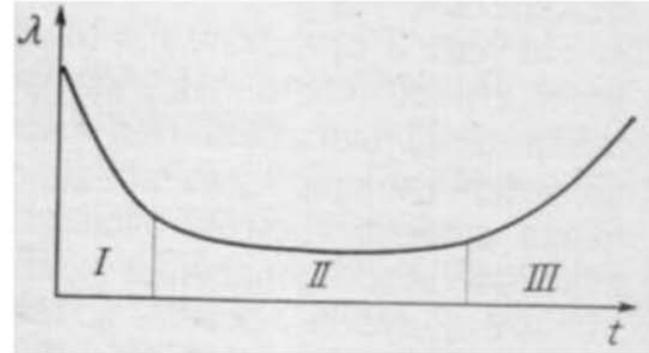
группа	Тип элемента	Число элементов, m	$\lambda_{эi} \cdot 10^{-7}$, 1/ч	$\lambda_{эi} \cdot m \cdot 10^{-7}$, 1/ч
1	ОУ	6	0,4	2,4
2	Транзистор	3	0,17	0,51
3	Диод	3	0,1	0,3
4	Резистор пленочный	35	0,19	6,65
5	Резистор переменный	5	0,05	0,25
6	Конденсатор керамический	15	0,02	0,3
7	Конденсатор оксидно-электролитический алюминиевый	7	0,26	1,82
8	Кнопка механическая	1	0,5	0,5
9	Светодиод	1	0,08	0,08

Периоды жизненного цикла

Первый – когда интенсивность отказов по времени падает, он называется **периодом приработки**.

ошибки производства:

- остаточное напряжение,
- неправильная регулировка,
- погрешность при изготовлении отдельных деталей,
- низкое качество сборки,
- отклонения от принятой технологии изготовления,
- небрежность при изготовлении.

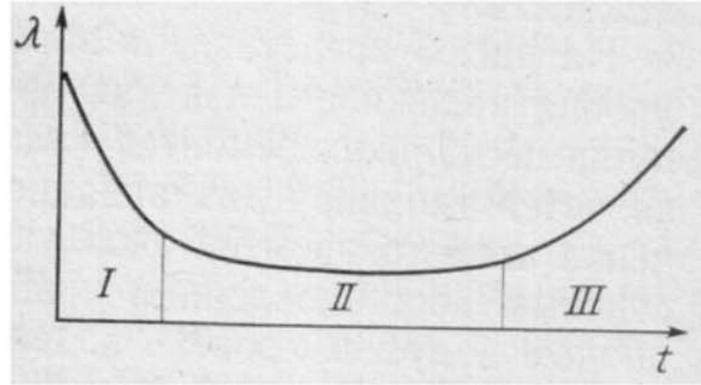


Отказы, возникающие в этот период называются **приработочными**.

Факторы, влияющие на уровень приработочных отказов:

- степень соответствия технологии современному уровню;
- достигнутая точность изготовления изделий;
- степень автоматизации производства;
- уровень технологической дисциплины;
- совершенство технического контроля;
- уровень унификации (использование ранее отработанных узлов и деталей);
- степень использования и соблюдения стандартов;
- качество приемо-сдаточных испытаний;
- степень эффективности системы управления качеством продукции на производстве.

На втором участке интенсивность отказов по времени практически остается постоянной, этот период называется **периодом нормальной эксплуатации.**

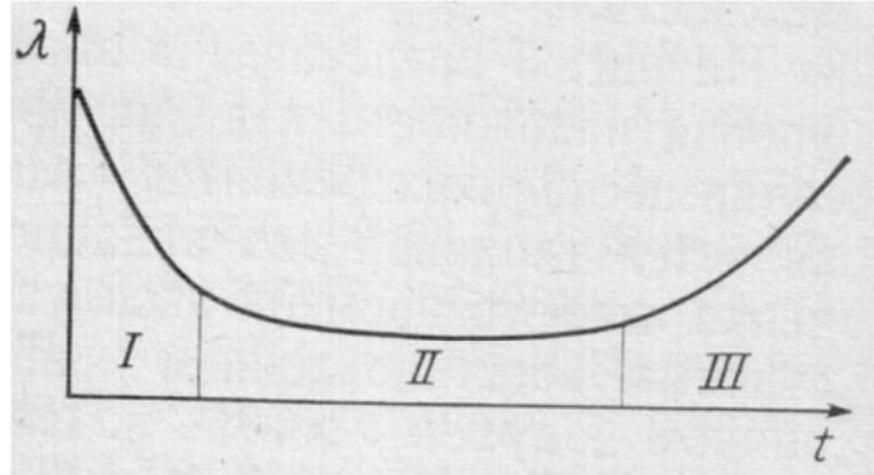


Группа факторов, влияющих на уровень отказов в этом периоде:

- 1) Первая группа** – факторы относящиеся к конструктивному совершенству изделия. Изделие должно быть менее чувствительным к воздействию различных случайных факторов (прочность материала, конструктивные решения охлаждения рабочих деталей).
- 2) Вторая группа** – факторы условий эксплуатации (климатические условия (температура, давление, влажность, высота над уровнем моря, морской климат, пыль, уровень вибрации)
- 3) Третья группа** - ошибки в действиях обслуживающего персонала – относятся к разряду внезапных.

Периоды жизненного цикла

Третий период – период износа и старения. На третьем участке интенсивность отказов начинает возрастать. Появляются отказы, вызываемые старением, износом, усталостью, коррозией, изменением материалов отдельных элементов изделия.

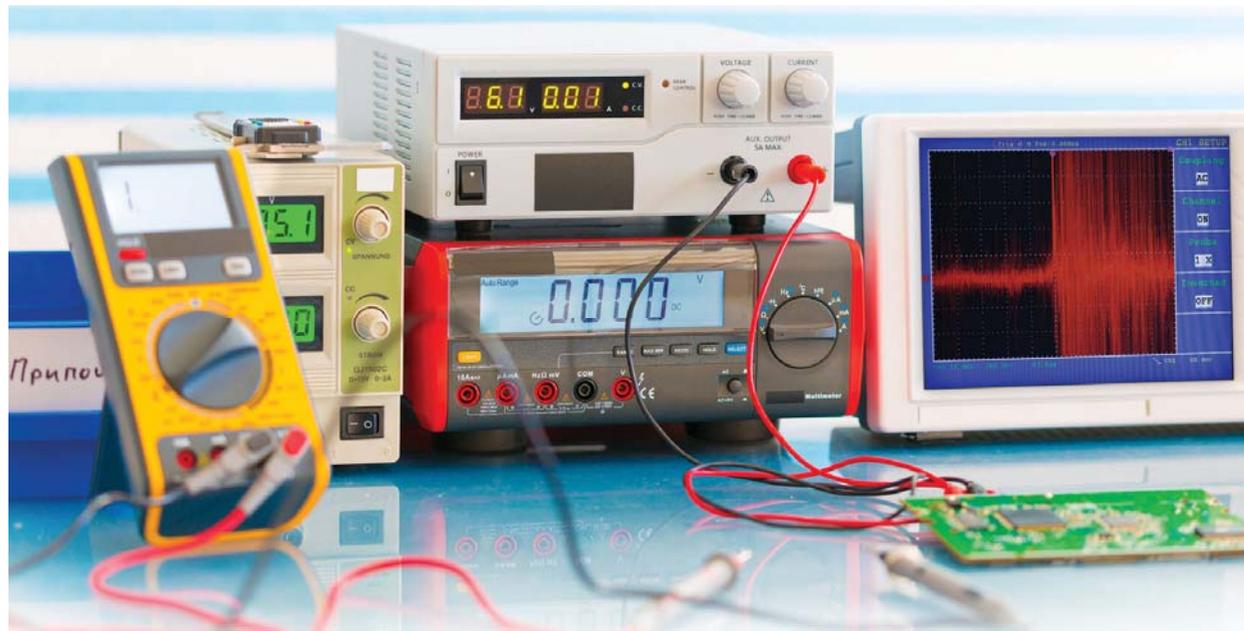


Основные факторы, влияющие на процессы в третьем периоде:

- использование более надёжных узлов;
- упрочнение материала поверхности сопряжённых деталей;
- защита от всех видов коррозий;
- соблюдение технологии изготовления деталей и узлов;
- эксплуатационные нагрузки.

Измерительная техника

На протяжении всего развития радиоэлектронных устройств и компонентов, существовала необходимость объективной оценки исправности и параметров как отдельных радиодеталей, так и готовых изделий. Это приводило и приводит к необходимости иметь парк измерительных приборов. Функциональные особенности их весьма разнообразны. При этом, измерительные приборы сами по себе также являются отдельной областью электроники. Точность измерительной техники является важнейшим фактором, от которого напрямую зависит качество разработанной и отлаженной с их помощью радиоаппаратуры. Не менее важно и соблюдение методики измерений (см. Метрология). Наиболее точные приборы используются для специальных применений, и недоступны большинству разработчиков. Приборы начального уровня (мультиметр, блок питания лабораторный) нередко изготавливались энтузиастами самостоятельно.



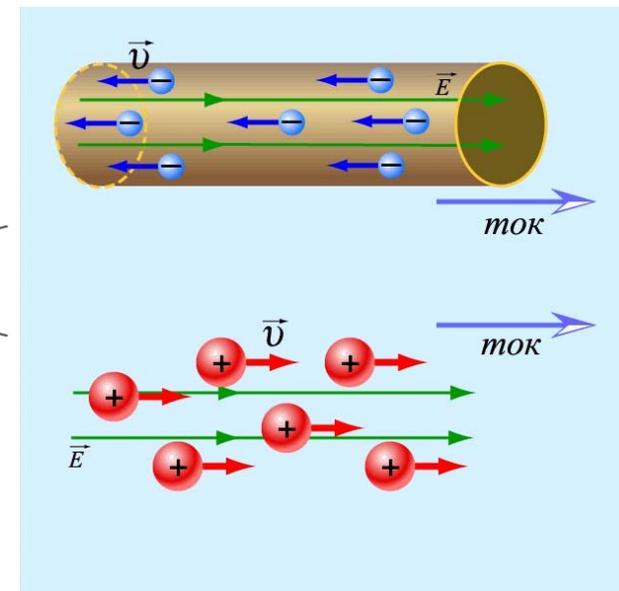
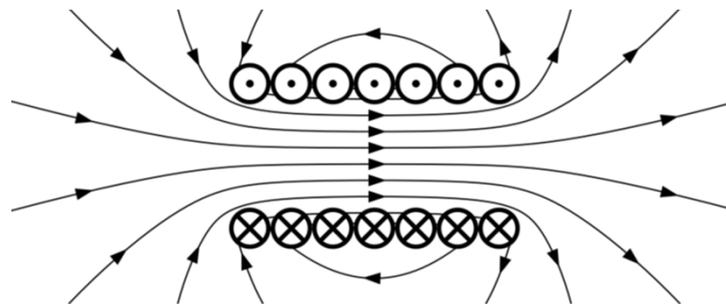
Электрический ток

Электрический ток — направленное или упорядоченное движение *частиц* или *квазичастиц* — носителей электрического заряда. Последующее электромагнитное взаимодействие между заряженными частицами осуществляется не прямо, а посредством *электромагнитного поля*. Скорость распространения электромагнитного поля или скорость электромагнитного излучения достигает скорости света, что многократно превышает скорость движения самих носителей электрического заряда.

Иногда электрическим током называют также ток смещения, возникающий в результате изменения в пространстве электрического поля.

Носителями электрического заряда могут являться:

- в металлах — **электроны**,
- в электролитах — **ионы (катионы и анионы)**,
- в газах — **ионы и электроны**,
- в вакууме при определённых условиях — **электроны**,
- в полупроводниках — **электроны или дырки** (электронно-дырочная проводимость).
- в квантовой теории поля — **фотон**.



Электрический ток

Электрический ток — имеет следующие проявления:

- нагревание проводников (не происходит в сверхпроводниках);
- изменение химического состава проводников (наблюдается преимущественно в электролитах);
- создание магнитного поля (проявляется у всех без исключения проводников).

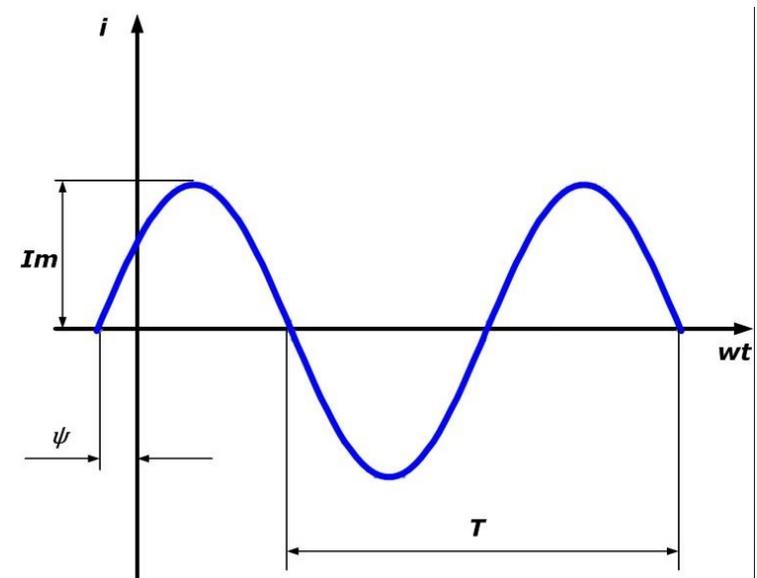
Если заряженные частицы движутся внутри макроскопических тел относительно той или иной среды, то такой ток называют электрический ток проводимости. Если движутся макроскопические заряженные тела (например, заряженные капли дождя), то этот ток называют конвекционным.

Различают постоянный и переменный электрические токи, а также всевозможные разновидности переменного тока. В таких понятиях часто слово «электрический» опускают.

- **Однонаправленный ток** — это электрический ток, не изменяющий своего направления.
- **Постоянный ток** — ток, направление и величина которого не меняются во времени.
- **Переменный ток** — электрический ток, изменяющийся во времени. Под переменным током понимают любой ток, не являющийся постоянным.
- **Периодический ток** — электрический ток, мгновенные значения которого повторяются через равные интервалы времени в неизменной последовательности.
- **Пульсирующий ток** — это периодический электрический ток, среднее значение которого за период отлично от нуля.

Электрический ток

- **Синусоидальный ток** — периодический электрический ток, являющийся синусоидальной функцией времени. Среди переменных токов основным является ток, величина которого изменяется по синусоидальному закону. В этом случае потенциал каждого конца проводника изменяется по отношению к потенциалу другого конца проводника попеременно с положительного на отрицательный и наоборот, проходя при этом через все промежуточные потенциалы (включая и нулевой потенциал). В результате возникает ток, непрерывно изменяющий направление: при движении в одном направлении он возрастает, достигая максимума, именуемого амплитудным значением, затем спадает, на какой-то момент становится равным нулю, потом вновь возрастает, но уже в другом направлении и также достигает максимального значения, спадает, чтобы затем вновь пройти через ноль, после чего цикл всех изменений возобновляется.



Электрический ток

- **Квазистационарный ток** — «относительно медленно изменяющийся переменный ток, для мгновенных значений которого с достаточной точностью выполняются законы постоянных токов» (БСЭ). Этими законами являются закон Ома, правила Кирхгофа и другие. Квазистационарный ток, так же как и постоянный ток, имеет одинаковую силу тока во всех сечениях неразветвлённой цепи. При расчёте цепей квазистационарного тока из-за возникающей э. д. с. индукции ёмкости и индуктивности учитываются как сосредоточенные параметры. Квазистационарными являются обычные промышленные токи, кроме токов в линиях дальних передач, в которых условие квазистационарности вдоль линии не выполняется. Электромагнитные возмущения распространяются по электрической цепи со скоростью света, поэтому для периодически изменяющихся токов условие квазистационарности имеет вид: $\tau = l/c \ll T$, где l — длина проводника, c — скорость света, T — период изменений. Например, ток промышленной частоты 50 Гц квазистационарен для цепей протяженностью до 100 км.

Квазистационарный ток

Закон Ома и правила Кирхгофа установлены для постоянного тока. Электромагнитные колебания совершаются с большой частотой.

При определенных условиях мгновенные значения изменяющегося тока можно считать постоянными.

$$\tau \ll T \quad \text{Условие квазистационарности} \quad (1)$$

Токи, удовлетворяющие такому условию, называются квазистационарными.

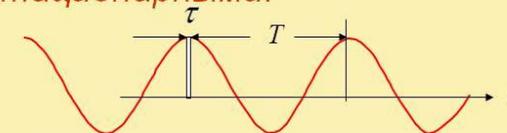
Пример: Длина цепи $l = 3$

Скорость распространения сигнала $c = 3 \cdot 10^8$ м/с

Время прохождения сигналом цепи

$$\tau = \frac{l}{c} = \frac{3}{3 \cdot 10^8} = 10^{-8} \text{ с} \quad \text{для } \tau = 0,01T$$

Условие (1) выполняется для частот $\nu = 100$ МГц

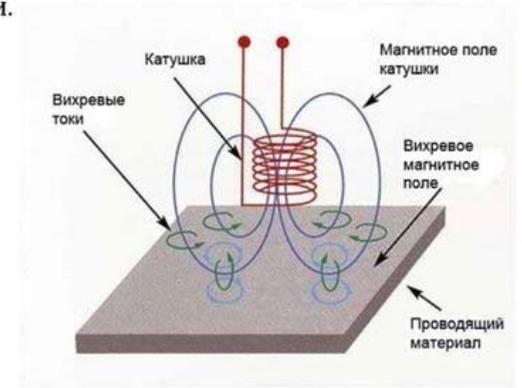
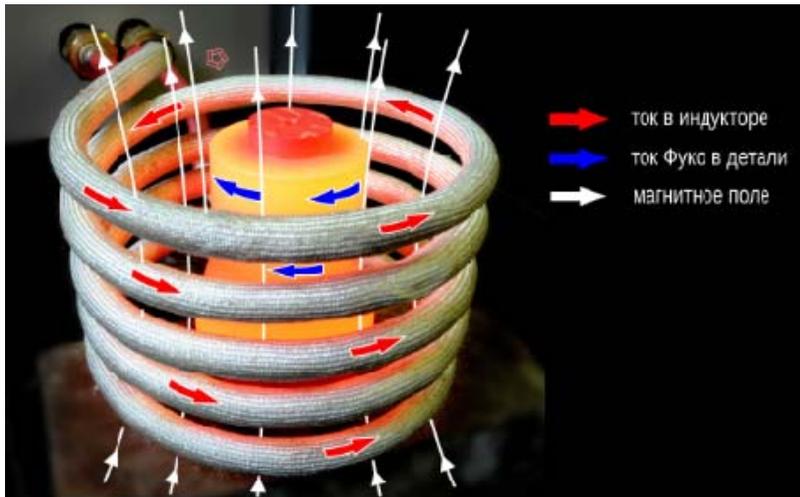


Электрический ток

• **Ток высокой частоты** — переменный ток, (начиная с частоты приблизительно в десятки кГц), для которого становятся значимыми такие явления, как излучение электромагнитных волн и скин-эффект. Кроме того, если длина волны излучения переменного тока становится сравнимой с размерами элементов электрической цепи, то нарушается условие квазистационарности, что требует особых подходов к расчёту и проектированию таких цепей.

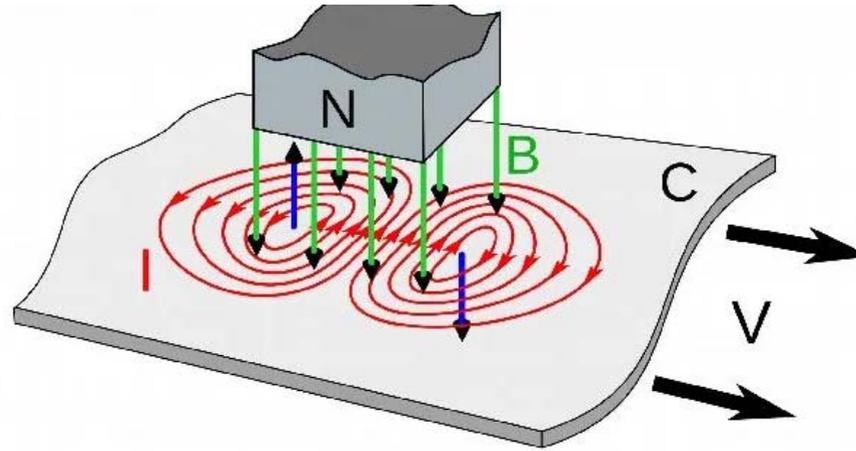
Поверхностная закалка ТВЧ

- Закалка сталей токами высокой частоты (ТВЧ) — это один из распространенных методов поверхностной термической обработки, который позволяет повысить твердость поверхности заготовок. Применяется для деталей из углеродистых и конструкционных сталей или чугуна. Индукционная закалка ТВЧ является одним из самых экономичных и технологичных способов упрочнения. Она дает возможность закалить всю поверхность детали или отдельные ее элементы или зоны, которые испытывают основную нагрузку.
- При этом под закаленной твердой наружной поверхностью заготовки остаются незакаленные вязкие слои металла. Такая структура уменьшает хрупкость, повышает стойкость и надежность всего изделия, а также снижает энергозатраты на нагрев всей детали.

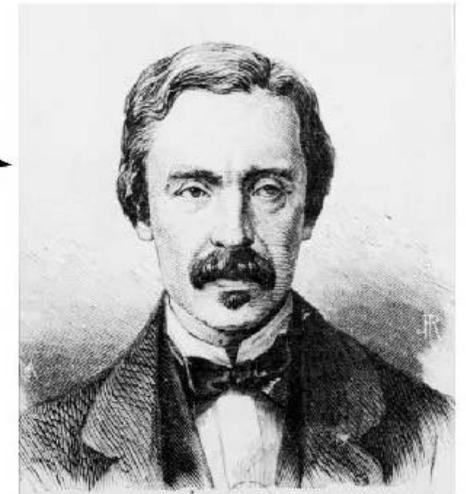


Вихревые токи

• **Вихревые токи (токи Фуко)** — «замкнутые электрические токи в массивном проводнике, которые возникают при изменении пронизывающего его магнитного потока», поэтому вихревые токи являются индукционными токами. Чем быстрее изменяется магнитный поток, тем сильнее вихревые токи. Вихревые токи не текут по определённым путям в проводах, а замыкаясь в проводнике образуют вихреобразные контуры. Существование вихревых токов приводит к скин-эффекту, то есть к тому, что переменный электрический ток и магнитный поток распространяются в основном в поверхностном слое проводника. Нагрев вихревыми токами проводников приводит к потерям энергии, особенно в сердечниках катушек переменного тока. Для уменьшения потерь энергии на вихревые токи применяют деление магнитопроводов переменного тока на отдельные пластины, изолированные друг от друга и расположенные перпендикулярно направлению вихревых токов, что ограничивает возможные контуры их путей и сильно уменьшает величину этих токов. При очень высоких частотах вместо ферромагнетиков для магнитопроводов применяют магнитодиэлектрики, в которых из-за очень большого сопротивления вихревые токи практически не возникают.



Вихревые токи — это такие токи, которые начинают протекать в проводнике, когда на него воздействует переменное магнитное поле.



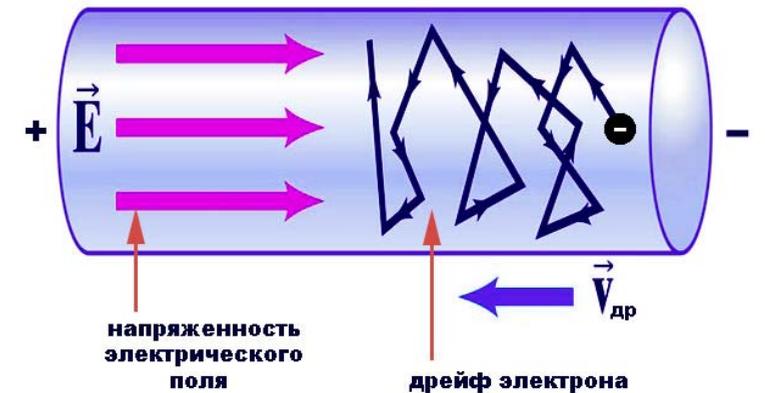
Жан Бернар Леон Фуко

Направление тока

- Исторически принято, что **направление тока совпадает с направлением движения положительных зарядов** в проводнике. При этом, если единственными носителями тока являются отрицательно заряженные частицы (например, электроны в металле), то направление тока противоположно направлению движения заряженных частиц.

Дрейфовая скорость электронов

Скорость (дрейфовая) направленного движения частиц в проводниках, вызванного внешним полем, зависит от материала проводника, массы и заряда частиц, окружающей температуры, приложенной разности потенциалов и составляет величину, намного меньшую скорости света. За 1 секунду электроны в проводнике перемещаются за счёт упорядоченного движения меньше чем на 0,1 мм — в 20 раз меньше скорости улитки. Несмотря на это, скорость распространения собственно электрического тока равна скорости света (скорости распространения фронта электромагнитной волны). То есть то место, где электроны изменяют скорость своего движения после изменения напряжения, перемещается со скоростью распространения электромагнитных колебаний.



Сила и плотность тока

Электрический ток имеет количественные характеристики: скалярную — силу тока, и векторную — плотность тока.

- **Сила тока** — физическая величина, равная отношению количества заряда ΔQ , прошедшего за некоторое время Δt через поперечное сечение проводника, к величине этого промежутка времени. $I = \Delta Q / \Delta t$.

Сила тока в Международной системе единиц (СИ) измеряется в амперах (А).

По закону Ома сила тока I на участке цепи прямо пропорциональна напряжению U , приложенному к этому участку цепи, и обратно пропорциональна его сопротивлению R : $I = U R$.

Если на участке цепи электрический ток не постоянный, то напряжение и сила тока постоянно изменяется, при этом у обычного переменного тока средние значения напряжения и силы тока равны нулю. Однако средняя мощность выделяемого при этом тепла нулю не равна. Поэтому применяют следующие понятия:

- **мгновенные напряжение и сила тока**, то есть действующие в данный момент времени.
- **амплитудные напряжение и сила тока**, то есть максимальные абсолютные значения
- **эффективные (действующие) напряжение и сила тока** определяются тепловым действием тока, то есть имеют те же значения, которые они имеют у постоянного тока с таким же тепловым эффектом.
- **Плотность тока** — вектор, абсолютная величина которого равна отношению силы тока, протекающего через некоторое сечение проводника, перпендикулярное направлению тока, к площади этого сечения, а направление вектора совпадает с направлением движения положительных зарядов, образующих ток.

Согласно закону Ома в дифференциальной форме плотность тока в среде \vec{j} пропорциональна напряжённости электрического поля \vec{E} и проводимости среды σ : $\vec{j} = \sigma \vec{E}$.

Мощность

При наличии тока в проводнике совершается работа против сил сопротивления. Электрическое сопротивление любого проводника состоит из двух составляющих:

- **активное сопротивление** — сопротивление теплообразованию;
- **реактивное сопротивление** — «сопротивление, обусловленное передачей энергии электрическому или магнитному полю (и обратно)».

Как правило, большая часть работы электрического тока выделяется в виде тепла. Мощностью тепловых потерь называется величина, равная количеству выделившегося тепла в единицу времени. Согласно закону Джоуля — Ленца мощность тепловых потерь в проводнике пропорциональна силе протекающего тока и приложенному напряжению:

$$P = IU = I^2 R = \frac{U^2}{R}$$

- Мощность измеряется в ваттах.

В сплошной среде объёмная мощность потерь p определяется скалярным произведением вектора плотности тока \vec{j} и вектора напряжённости электрического поля \vec{E} в данной точке:

$$p = (\vec{j}\vec{E}) = \sigma E^2 = \frac{j^2}{\sigma}$$

Объёмная мощность измеряется в ваттах на кубический метр.

Мощность

Сопротивление излучению вызвано образованием электромагнитных волн вокруг проводника. Это сопротивление находится в сложной зависимости от формы и размеров проводника, от длины излучаемой волны. Для одиночного прямолинейного проводника, в котором везде ток одного направления и силы, и длина которых L значительно меньше длины излучаемой им электромагнитной волны λ , зависимость сопротивления от длины волны и проводника относительно проста:

$$R = 3200 \left(\frac{L}{\lambda} \right)$$

Наиболее применяемому электрическому току со стандартной частотой 50 Гц соответствует волна длиной около 6 тысяч километров, именно поэтому мощность излучения обычно пренебрежительно мала по сравнению с мощностью тепловых потерь. Однако, с увеличением частоты тока длина излучаемой волны уменьшается, соответственно возрастает мощность излучения.

Проводник, способный излучать заметную энергию, называется антенной.

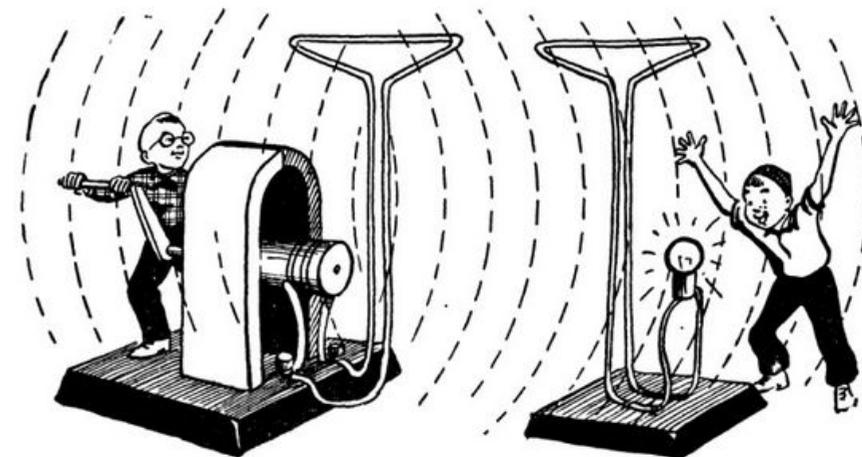


Рис. 29.
Электромагнитные волны наводят в приемной антенне переменный ток и, таким образом, переносят от передатчика к приемнику определенную энергию.

Частота

Понятие **частоты** относится к переменному току, периодически изменяющему силу или направление. Сюда же относится наиболее часто применяемый ток, изменяющийся по синусоидальному закону.

Период переменного тока — наименьший промежуток времени (выраженный в секундах), через который изменения силы тока (и напряжения) повторяются. Количество периодов, совершаемое током за единицу времени, носит название частота. Частота измеряется в герцах, один герц (Гц) соответствует одному периоду в секунду.

v СКОРОСТЬ ВОЛНЫ

$$v = \frac{\lambda}{T}$$

T ПЕРИОД

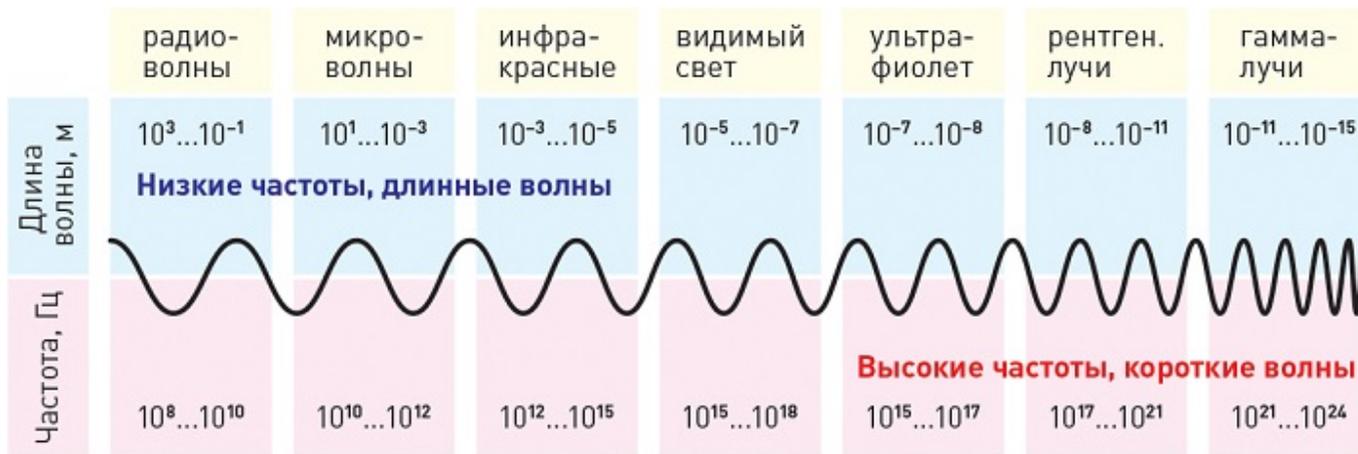
$$v = \lambda \cdot \nu$$

λ ДЛИНА ВОЛНЫ

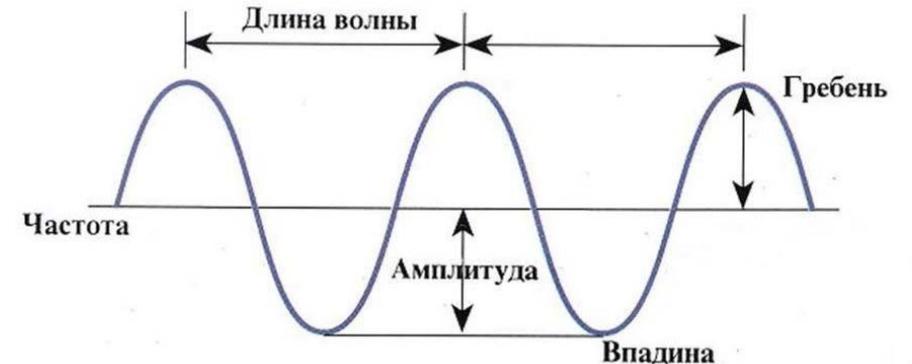
$$\lambda = v \cdot T$$

ν ЧАСТОТА

$$\lambda = \frac{v}{\nu}$$



Параметры волны



- Длина [нм]
- Частота [Гц]
- Амплитуда [дБ]
- Период колебания [нс]

Ток смещения

Иногда для удобства вводят понятие тока смещения. В уравнениях Максвелла ток смещения присутствует на равных правах с током, вызванным движением зарядов. Интенсивность магнитного поля зависит от полного электрического тока, равного сумме тока проводимости и тока смещения. По определению, плотность тока смещения $\vec{j} \rightarrow \mathbf{D}$ — векторная величина, пропорциональная скорости изменения электрического поля $\mathbf{E} \rightarrow$:

$$\vec{j}_D = \varepsilon_0 \varepsilon \frac{\partial \vec{E}}{\partial t},$$

где ε_0 — электрическая постоянная, а ε — диэлектрическая проницаемость. При изменении электрического поля, так же, как и при протекании тока, происходит генерация магнитного поля, что делает эти два процесса похожими друг на друга. Кроме того, изменение электрического поля обычно сопровождается переносом энергии. Например, при зарядке и разрядке конденсатора, несмотря на то, что между его обкладками не происходит движения заряженных частиц, говорят о протекании через него тока смещения, переносящего некоторую энергию и своеобразным образом замыкающего электрическую цепь. Ток смещения I_D в конденсаторе определяется по формуле:

$$I_D = \frac{dQ}{dt} = -C \frac{dU}{dt},$$

где Q — заряд на обкладках конденсатора, U — разность потенциалов между обкладками, C — ёмкость конденсатора.

Ток смещения не является электрическим током, поскольку не связан с перемещением электрического заряда.

Основные типы проводников

В отличие от диэлектриков в проводниках имеются свободные носители нескомпенсированных зарядов, которые под действием силы, как правило разности электрических потенциалов, приходят в движение и создают электрический ток. Вольт-амперная характеристика (зависимость силы тока от напряжения) является важнейшей характеристикой проводника. Для металлических проводников и электролитов она имеет простейший вид: сила тока прямо пропорциональна напряжению (закон Ома).

- **Металлы** — здесь носителями тока являются электроны проводимости, которые принято рассматривать как электронный газ, отчётливо проявляющий квантовые свойства вырожденного газа.
- **Плазма** — ионизированный газ. Электрический заряд переносится ионами (положительными и отрицательными) и свободными электронами, которые образуются под действием излучения (ультрафиолетового, рентгеновского и других) и нагревания.
- **Электролиты** — «жидкие или твёрдые вещества и системы, в которых присутствуют в сколько-нибудь заметной концентрации ионы, обуславливающие прохождение электрического тока». Ионы образуются в процессе электролитической диссоциации. При нагревании сопротивление электролитов падает из-за увеличения числа молекул, разложившихся на ионы. В результате прохождения тока через электролит ионы подходят к электродам и нейтрализуются, оседая на них. Законы электролиза Фарадея определяют массу вещества, выделившегося на электродах.
- **Вакуум** - существует также электрический ток электронов в вакууме, который используется в электронно-лучевых приборах.

Электрические токи в природе

- **Атмосферное электричество** — электричество, которое содержится в воздухе. Впервые показал присутствие электричества в воздухе и объяснил причину грома и молнии Бенджамин Франклин. В дальнейшем было установлено, что электричество накапливается в сгущении паров в верхних слоях атмосферы, и указаны следующие законы, которым следует атмосферное электричество:
 - **при ясном небе**, так же как и при облачном, электричество атмосферы всегда положительное, если на некотором расстоянии от места наблюдения не идёт дождь, град или снег;
 - **напряжение электричества** облаков становится достаточно сильным для выделения его из окружающей среды лишь тогда, когда облачные пары сгущаются в дождевые капли, доказательством чего может служить то, что разрядов молний не бывает без дождя, снега или града в месте наблюдения, исключая возвратный удар молнии;
 - **атмосферное электричество** увеличивается по мере возрастания влажности и достигает максимума при падении дождя, града и снега;
 - **место, где идёт дождь**, является резервуаром положительного электричества, окружённым поясом отрицательного, который, в свою очередь, заключён в пояс положительного. На границах этих поясов напряжение равно нулю. Движение ионов под действием сил электрического поля формирует в атмосфере вертикальный ток проводимости со средней плотностью, равной около $(2\div 3)\cdot 10^{-12}$ А/м². Полный ток, текущий на всю поверхность Земли, при этом составляет приблизительно 1800 А. Молния является естественным искровым электрическим разрядом.



Использование электрического тока как носителя энергии

- получения механической энергии во всевозможных электродвигателях,
 - получения тепловой энергии в нагревательных приборах, электропечах, при электросварке,
 - получения световой энергии в осветительных и сигнальных приборах,
 - возбуждения электромагнитных колебаний высокой частоты, сверхвысокой частоты и радиоволн,
 - получения звука в акустических системах,
 - получения различных веществ путём электролиза, зарядка электрических аккумуляторов.
- Здесь электромагнитная энергия превращается в химическую,
- создания магнитного поля (в электромагнитах).



Электрические токи в биологии

- **Биотоки** — движение ионов и электронов играет весьма существенную роль во всех жизненных процессах. Создаваемый при этом биопотенциал существует как на внутриклеточном уровне, так и у отдельных частей тела и органов. Передача нервных импульсов происходит при помощи электрохимических сигналов. Некоторые животные (электрические скаты, электрический угорь) способны накапливать потенциал в несколько сот вольт и используют это для самозащиты.

Передача сигнала от нервной системы к мышцам



Нервно-мышечный синапс (концевая пластинка) — типичный химический синапс, главный медиатор - ацетилхолин

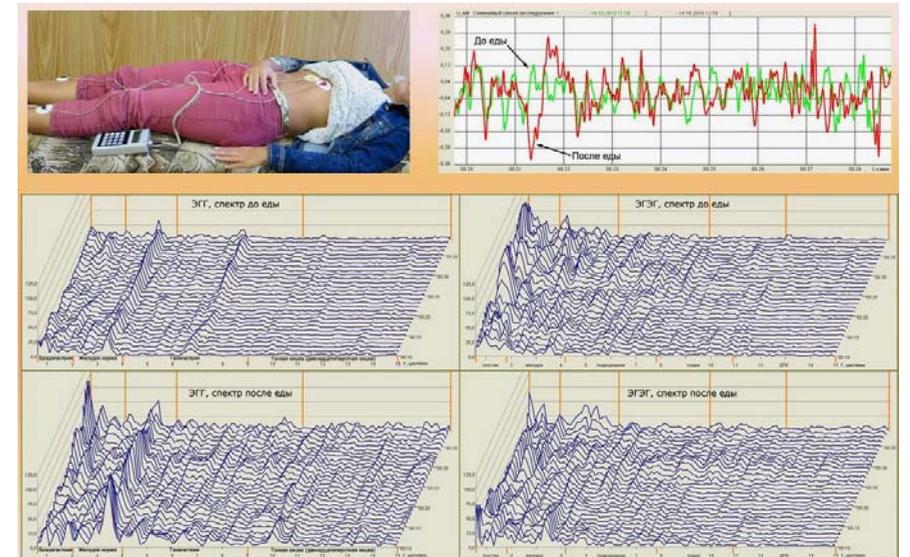
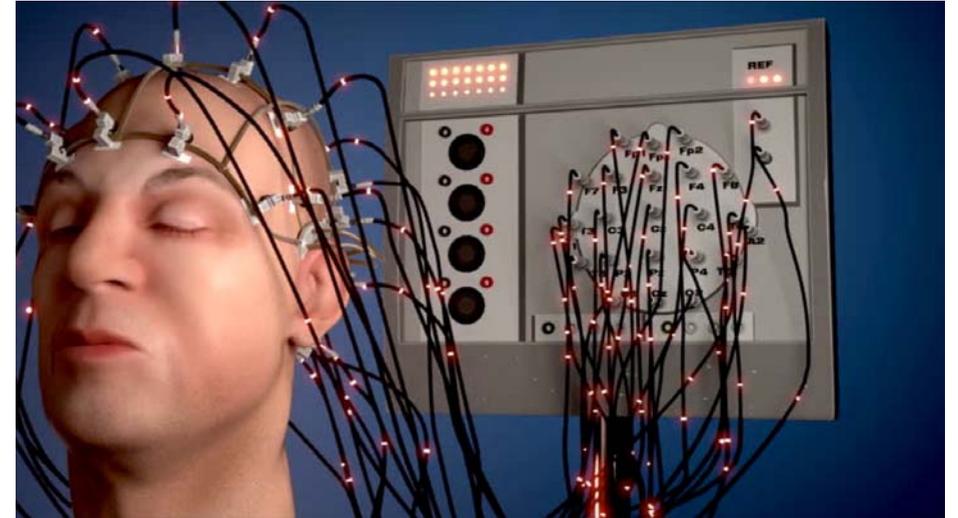
Два типа рецепторов к ацетилхолину

Н – никотиновые ионотропные

М – мускариновые metabotropic

Использование электрического тока в медицине

- **Диагностика** — биотоки здоровых и больных органов различны, при этом бывает возможно определить болезнь, её причины и назначить лечение. Раздел физиологии, изучающий электрические явления в организме называется электрофизиология.
- **Электроэнцефалография** — метод исследования функционального состояния головного мозга.
- **Электрокардиография** — методика регистрации и исследования электрических полей при работе сердца.
- **Электрогастрография** — метод исследования моторной деятельности желудка.
- **Электромиография** — метод исследования биоэлектрических потенциалов, возникающих в скелетных мышцах.
- **Лечение и реанимация:** электростимуляция определённых областей головного мозга; лечение болезни Паркинсона и эпилепсии, также для электрофореза. Водитель ритма, стимулирующий сердечную мышцу импульсным током, используют при брадикардии и иных сердечных аритмиях.



Поражение током

- Тело человека является проводником электрического тока. Сопротивление человека при сухой и неповрежденной коже колеблется от 3 до 100 кОм.

Ток, пропущенный через организм человека или животного, приводит к следующим воздействиям:

- **термическому** (ожоги, нагрев и повреждение кровеносных сосудов);
- **электролитическому** (разложение крови, нарушение физико-химического состава);
- **биологическому** (раздражение и возбуждение тканей организма, судороги);
- **механическому** (разрыв кровеносных сосудов под действием давления пара, полученного нагревом крови).

Основным фактором, обуславливающим исход поражения током, является величина тока, проходящего через тело человека. По технике безопасности электрический ток классифицируется следующим образом:

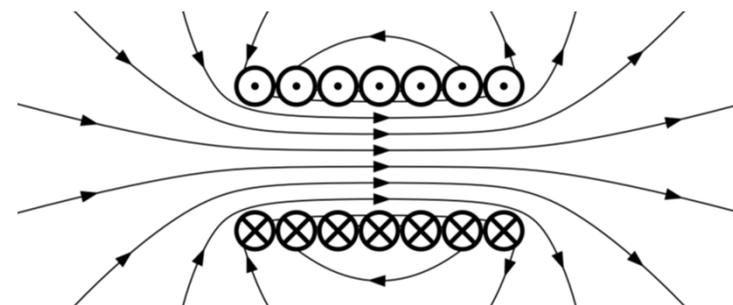
- **безопасным** считается ток, длительное прохождение которого через организм человека не причиняет ему вреда и не вызывает никаких ощущений, его величина не превышает 50 мкА (переменный ток 50 Гц) и 100 мкА постоянного тока;
- **минимально ощутимый** человеком переменный ток составляет около 0,6—1,5 мА (переменный ток 50 Гц) и 5—7 мА постоянного тока;
- **пороговым неотпускающим** называется минимальный ток такой силы, при которой человек уже неспособен усилием воли оторвать руки от токоведущей части. Для переменного тока – 10-15 мА, для постоянного – 50-80 мА;
- **фибрилляционным** порогом называется сила переменного тока (50 Гц) около 100 мА и 300 мА постоянного тока, воздействие которого дольше 0,5 сек с большой вероятностью вызывает фибрилляцию сердечных мышц. Этот порог одновременно считается условно смертельным для человека.

Электрическое напряжение

Электрическое напряжéние между точками А и В электрической цепи или электрического поля — скалярная физическая величина, значение которой численно равно работе эффективного электрического поля (включающего сторонние поля), совершаемой при переносе пробного электрического заряда из точки А в точку В, делённой на величину этого заряда.

При этом перенос пробного заряда не изменяет распределения зарядов на источниках поля. Напряжение в общем случае формируется из вкладов двух работ: работы электрических сил A^{el}_{AB} и работы сторонних сил A^{ex}_{AB} . Если на участке цепи не действуют сторонние силы (то есть $A^{ex}_{AB} = 0$), работа по перемещению включает только работу потенциального электрического поля A^{el}_{AB} (которая не зависит от пути, по которому перемещается заряд), и электрическое напряжение U_{AB} между точками А и В совпадает с разностью потенциалов между этими точками (поскольку $\varphi_A - \varphi_B = A^{el}_{AB} / q$). В общем случае напряжение U_{AB} между точками А и В отличается от разницы потенциалов между этими точками на работу сторонних сил по перемещению единичного положительного заряда. Эту работу называют электродвижущей силой \mathcal{E}_{AB} на данном участке цепи: $\mathcal{E}_{AB} = A^{ex}_{AB} / q$.

$$U_{AB} = \varphi_A - \varphi_B + \mathcal{E}_{AB}.$$



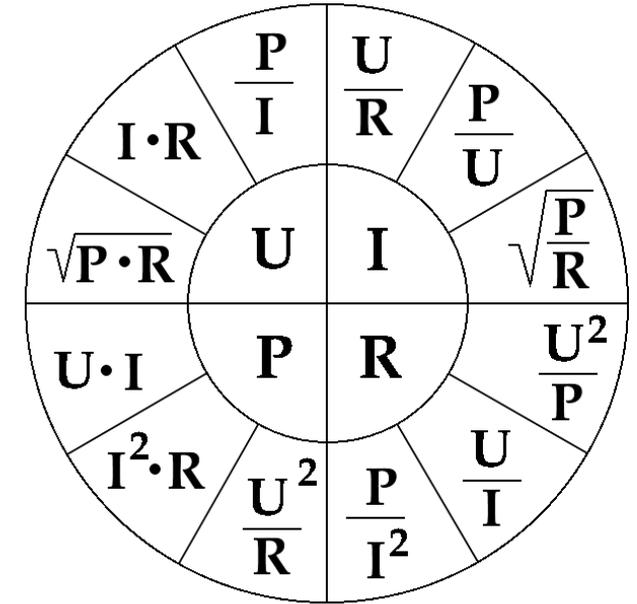
Электрическое напряжение

Определение электрического напряжения можно записать в другой форме. Для этого нужно представить работу A_{AB}^{ef} как интеграл вдоль траектории L , проложенной из точки A в точку B .

$$U_{AB} = \int_L \vec{E}_{ef} d\vec{l}$$

- интеграл от проекции эффективной напряжённости поля E_{ef} на касательную к траектории L , направление которой в каждой точке траектории совпадает с направлением вектора $d\vec{l}$ в данной точке. В электростатическом поле, когда сторонних сил нет, значение этого интеграла не зависит от пути интегрирования и совпадает с разностью потенциалов.

- **Размерность** электрического напряжения в Международной системе величин, на которой основана Международная система единиц (СИ), — $L^2MT^{-3}I^{-1}$.
- **Единицей измерения** напряжения в СИ является **Вольт** (русское обозначение: **В**; международное: **V**).
- **Понятие напряжение** ввёл **Георг Ом** в работе 1827 года, в которой предлагалась гидродинамическая модель электрического тока для объяснения открытого им в 1826 году эмпирического закона Ома: $U = I R$.



- U** – Напряжение
- I** – Сила тока
- P** – Мощность
- R** – Сопротивление

Напряжение в цепях постоянного тока

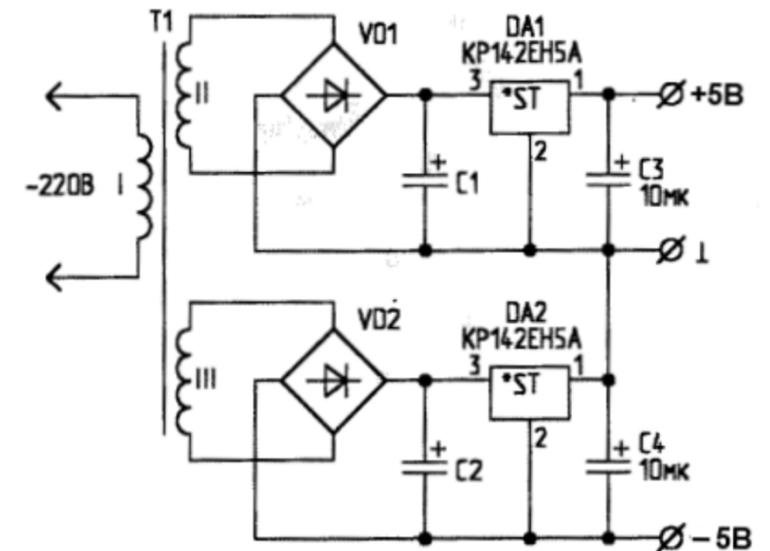
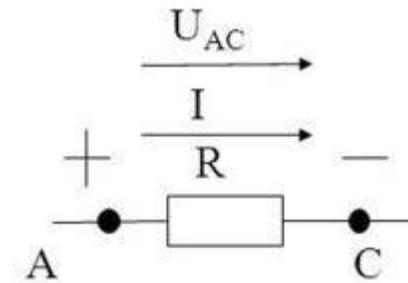
Исторически принято, что направление тока совпадает с направлением движения положительных зарядов в проводнике (Б. Франклин).

- **Напряжение** в цепи постоянного тока между точками А и В — удельная работа, которую совершает электрическое поле при переносе пробного положительного заряда из точки А в точку В.

Напряжение может быть условно отрицательным, например, при двуполярном питании.

- **При однополярном** источнике питания обычно «землём» считают один из выводов источника, чаще отрицательный вывод. Например, в автомобилях «землём» принято считать корпус автомобиля, который соединяют с отрицательной (тонкой) клеммой свинцового аккумулятора (однако так было не всегда).

- **При двуполярном** источнике за землю принимают его среднюю точку, и, соответственно, появляется **условно положительное** напряжение, — от средней точки источника до плюсовой клеммы, и **условно отрицательное** — от средней точки до минусовой клеммы. Это условное соглашение называют «полярностью напряжения».



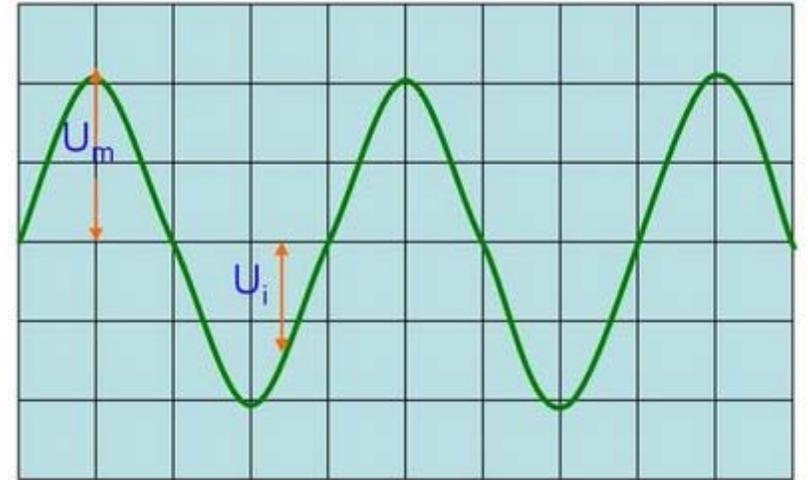
Напряжение в цепях переменного тока

Для описания цепей переменного тока применяются следующие напряжения:

- **мгновенное** напряжение;
- **амплитудное** значение напряжения;
- **среднее** значение напряжения;
- **среднеквадратическое** значение напряжения;
- **средневыпрямленное** значение напряжения.

• **Мгновенное напряжение** есть разность потенциалов между двумя точками, измеренная в данный момент времени. Зависит от времени (является функцией времени):

$$u = u(t).$$



Напряжение в цепях переменного тока

- **Амплитудное значение напряжения** есть максимальное по модулю значение мгновенного напряжения за весь период колебаний:

$$U_M = \max (| u (t) |) .$$

Для гармонических (синусоидальных) колебаний напряжения мгновенное значение напряжения выражается как:

$$u (t) = U_M \sin (\omega t + \phi) .$$

Для сети переменного синусоидального напряжения со среднеквадратическим значением 220 В амплитудное напряжение равно приблизительно 311 В.

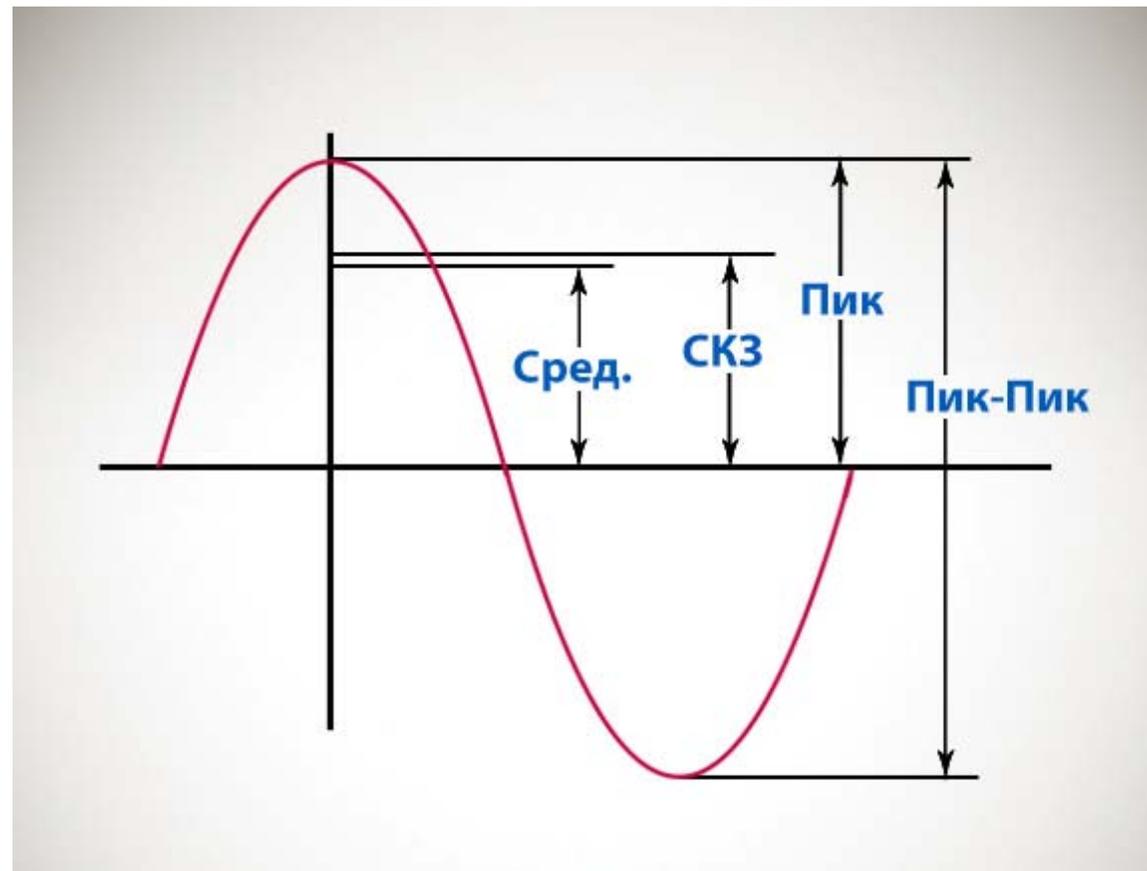
Амплитудное напряжение можно измерить с помощью осциллографа.

Напряжение в цепях переменного тока

- **Среднее значение напряжения** (постоянная составляющая напряжения) есть напряжение, определяемое за весь период колебаний, как:

$$U_m = \frac{1}{T} \int_0^T u(t) dt.$$

Для синусоиды среднее значение напряжения равно нулю.



Напряжение в цепях переменного тока

- **Среднеквадратическое значение напряжения** (электротехнические наименования: **действующее, эффективное**) есть напряжение, определяемое за весь период колебаний, как:

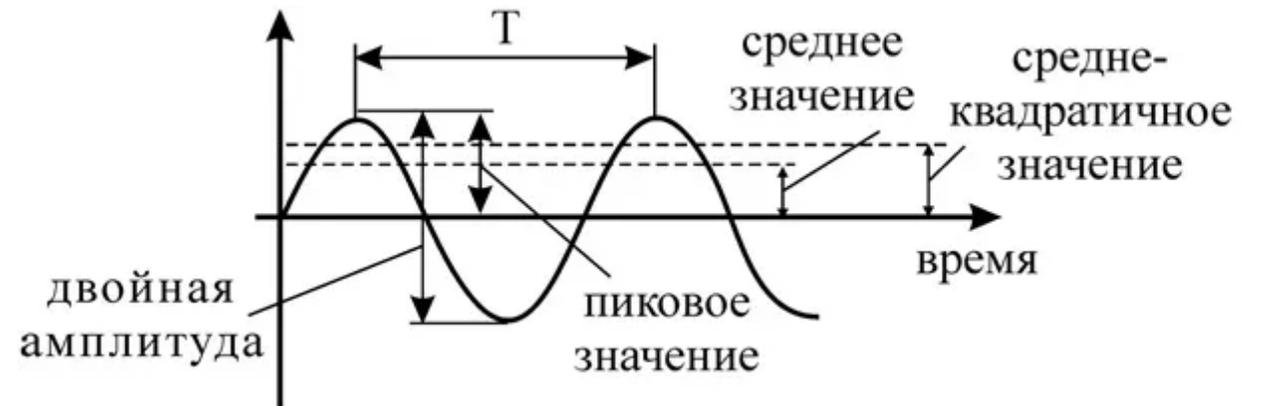
$$U_q = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T u^2(t) dt.}$$

Среднеквадратическое значение напряжения наиболее удобно для практических расчётов, так как на линейной активной нагрузке оно совершает ту же работу (например, лампа накаливания имеет ту же яркость свечения, нагревательный элемент выделяет столько же тепла), что и равное ему постоянное напряжение.

Для **синусоидального напряжения** справедливо равенство:

$$U_q = \frac{1}{\sqrt{2}} U_M \approx 0,707 U_M; \quad U_M = \sqrt{2} U_q \approx 1,414 U_q.$$

В технике и быту при использовании переменного тока под термином «напряжение» имеется в виду именно среднеквадратическое значение напряжения, и все вольтметры проградуированы, исходя из его определения. Однако конструктивно большинство приборов фактически измеряют не среднеквадратическое, а средневыпрямленное (см. ниже) значение напряжения, поэтому для несинусоидального сигнала их показания могут отличаться от истинного значения.



Напряжение в цепях переменного тока

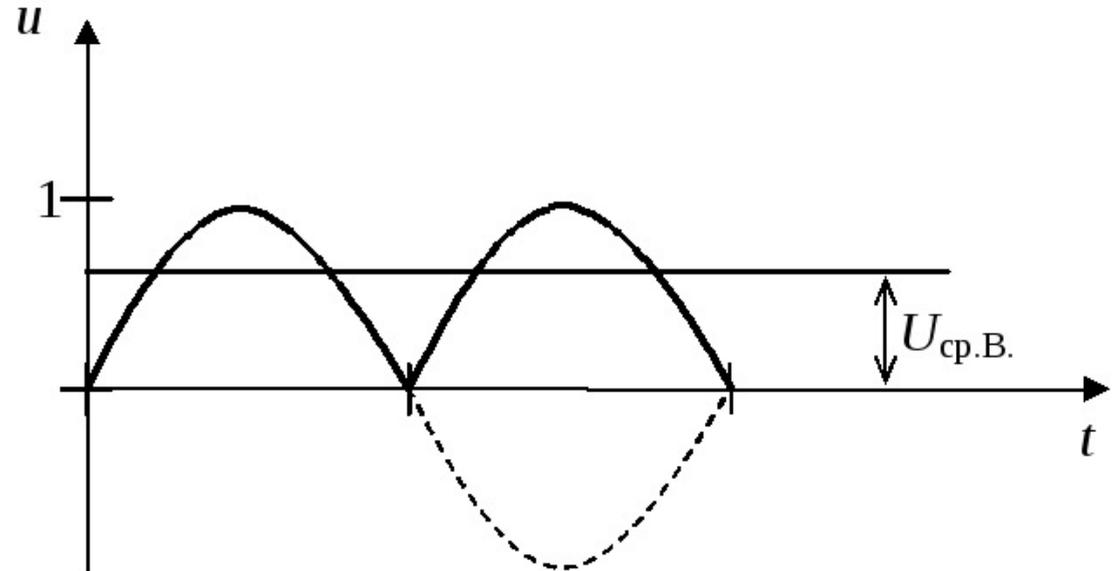
- Средневыпрямленное значение напряжения есть среднее значение модуля напряжения:

$$U_m = \frac{1}{T} \int_0^T |u(t)| dt.$$

Для синусоидального напряжения справедливо равенство:

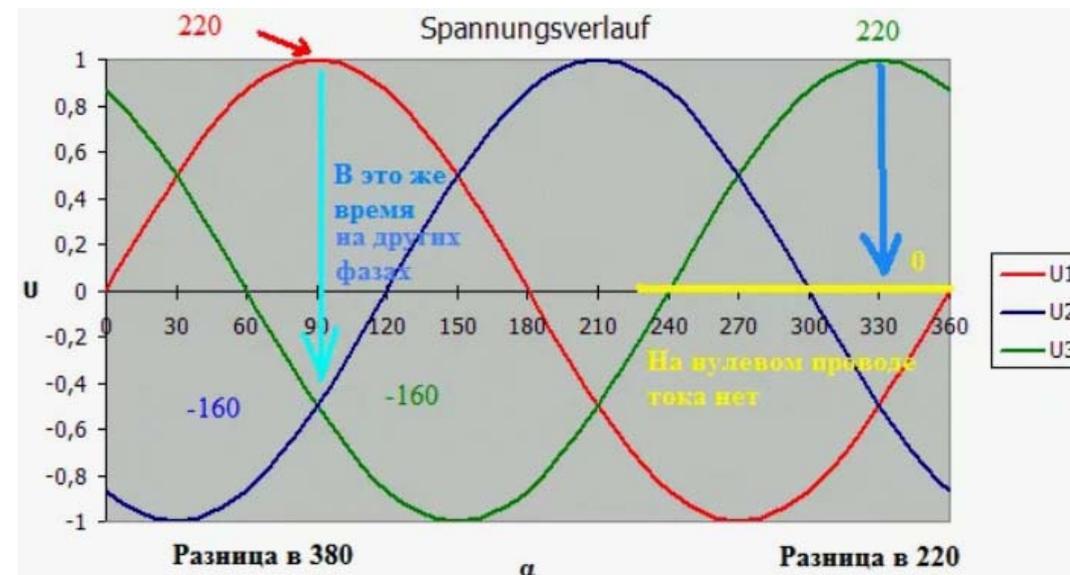
$$U_m = \frac{2}{\pi} U_M (\approx 0,637 U_M) = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} U_q (\approx 0,9 U_q).$$

На практике используется редко, однако большинство вольтметров переменного тока (те, в которых ток перед измерением выпрямляется) фактически измеряют именно эту величину, хотя их шкала и проградуирована по среднеквадратическим значениям.



Напряжение в цепях трёхфазного тока

- В цепях **трёхфазного тока** различают **фазное** и **линейное** напряжения.
 - Под **фазным напряжением** понимают среднеквадратичное значение напряжения на каждой из фаз нагрузки относительно нейтрали.
 - Под **линейным** — напряжение между подводящими фазными проводами. При соединении нагрузки в треугольник фазное напряжение равно линейному, а при соединении в звезду (при симметричной нагрузке или при глухозаземлённой нейтрали) линейное напряжение в 3 раз больше фазного.
- На практике напряжение трёхфазной сети обозначают дробью, в числителе которой стоит фазное при соединении в звезду (или, что то же самое, потенциал каждой из линий относительно земли), а в знаменателе — линейное напряжение. Так, в России наиболее распространены сети с напряжением 220/380 В; также иногда используются сети 127/220 В и 380/660 В.



Список источников.

1. <https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%AD%D0%BB%D0%B5%D0%BA%D1%82%D1%80%D0%BE%D0%BD%D0%B8%D0%BA%D0%B0>
2. <https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%AD%D0%BB%D0%B5%D0%BA%D1%82%D1%80%D0%B8%D1%87%D0%B5%D1%81%D0%BA%D0%B8%D0%B9%D1%82%D0%BE%D0%BA>
3. <https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%AD%D0%BB%D0%B5%D0%BA%D1%82%D1%80%D0%B8%D1%87%D0%B5%D1%81%D0%BA%D0%BE%D0%B5%D0%BD%D0%B0%D0%BF%D1%80%D1%8F%D0%B6%D0%B5%D0%BD%D0%B8%D0%B5>
4. <https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%9C%D0%BE%D1%89%D0%BD%D0%BE%D1%81%D1%82%D1%8C>
5. <https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%A8%D0%B8%D1%80%D0%BE%D1%82%D0%BD%D0%BE-%D0%B8%D0%BC%D0%BF%D1%83%D0%BB%D1%8C%D1%81%D0%BD%D0%B0%D1%8F%D0%BC%D0%BE%D0%B4%D1%83%D0%BB%D1%8F%D1%86%D0%B8%D1%8F>

Спасибо за внимание

ЧУ ПО «Социально-технологический колледж» г Тула

Преподаватель: Борисов Алексей Альбертович