

Министерство образования Республики Беларусь
БЕЛОРУССКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ

Кафедра «Системы автоматизированного проектирования»

А.В. Бородуля
А.В. Василевский
В.А. Кочуров

ТЕХНИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ИНТЕГРИРОВАННЫХ САПР

Методическое пособие

В 3 частях

Часть 2

Минск
БНТУ
2011

УДК 658.512.22.011.56:004(075.8)

ББК 30.2-5-05

Б 83

Рецензенты:

Ю.Е. Лившиц, В.В. Напрасников

Бородуля, А.В.

Б 83 Техническое обеспечение интегрированных САПР: методическое пособие: в 3 ч. / А.В. Бородуля, А.В. Василевский, В.А. Кочуров. – Минск: БНТУ, 2012. – Ч. 2. – 71 с.

ISBN 978-985-525-640-4 (Ч. 2).

Рассматриваются вопросы автоматического управления различными объектами с помощью ЭВМ на простых примерах управления движением суппорта токарного станка, электронагревателя и т. д. Изложены основы электронных усилителей и их элементов. Принципы устойчивости систем автоматического управления рассматриваются как продолжение вопросов обратной связи в усилителях. Описаны принципы работы блоков питания ЭВМ и вопросы энергосбережения ЭВМ.

Часть 1 настоящего пособия издана в БНТУ в 2010 г.

УДК 658.512.22.011.56:004(075.8)

ББК 30.2-5-05

ISBN 978-985-525-640-4 (Ч. 2)

ISBN 978-985-525-354-0

© Бородуля А.В.,
Василевский А.В.,
Кочуров В.А., 2012
© БНТУ, 2012

СОДЕРЖАНИЕ

1. УПРАВЛЕНИЕ.....	4
1.1. Управление движением суппорта станка.....	6
1.2. Применение ЭВМ для управления движением	8
1.3. Алгоритм управления движением суппорта.....	9
1.4. Импульсное управление электронагревателем.....	12
1.5. Регулирование напряжения.....	14
2. ЭЛЕКТРОННЫЙ УСИЛИТЕЛЬ.....	17
2.1. Электронно-вакуумные приборы.....	17
2.2. $p-n$ -переход, полупроводниковый диод.....	20
2.3. Биполярные транзисторы	22
2.4. Классы работы усилителя.....	23
2.5. Пример звукового усилителя	24
2.6. Условия возникновения самовозбуждения.....	27
2.7. Основные показатели усилителя.....	30
2.7.1. Усиление (gain).....	30
2.7.2. Ширина полосы пропускания (частотный диапазон – bandwidth)	32
2.7.3. Коэффициент полезного действия (КПД–efficiency)	32
2.7.4. Линейность (linearity).....	32
2.7.5. Шум (noise)	33
2.7.6. Выходной динамический диапазон (output dynamic range)	33
3. СКВОЗНОЙ АКУСТИЧЕСКИЙ ТАКТ	34
4. ПОЛЕВЫЕ ТРАНЗИСТОРЫ (FIELD EFFECT TRANSISTORS – FET)	39
5. ЛИНЕЙНЫЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ С ОТРИЦАТЕЛЬНОЙ ОБРАТНОЙ СВЯЗЬЮ	44
5.1. Блоки питания с непрерывным регулированием.....	44
5.2. Пример линейной системы управления с отрицательной обратной связью	46
5.3. Терморегулирование.....	51
6. ОХЛАЖДЕНИЕ ЭВМ	54
7. ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЕ В ЭВМ.....	57
8. ИМПУЛЬСНЫЕ БЛОКИ ПИТАНИЯ	61
8.1. Силовые импульсные цепи.....	63
8.2. Цифроаналоговые и аналого-цифровые преобразователи (ЦАП, АЦП).....	65
8.3. Источники бесперебойного питания (Uninterruptable Power Supply – UPS)	65
СПИСОК ИСТОЧНИКОВ.....	70

1. УПРАВЛЕНИЕ

Поскольку количество товаров и услуг на душу населения все время увеличивается, то для их создания приходится постоянно повышать производительность труда. Одним из основных средств для этого является *автоматизация* – выполнение работ без непосредственного участия человека. Предварительным этапом автоматизации часто бывает *механизация*, когда тяжелая физическая работа (например распиловка древесины, погрузка и т. д.) возлагается на машины, а человек только управляет этими машинами. На последующем этапе машины выполняют функцию управления, и тогда имеет место автоматизация. Целью механизации и автоматизации может быть также улучшение условий труда человека, например, перемещение его из загрязненной среды (шумной, горячей, вредной из-за химических веществ, опасной и т. д.). Здесь также могут применяться средства телемеханики – управления на расстоянии.

На этапе механизации используют источники энергии, необходимые для выполнения физической работы. Часто это различные двигатели (внутреннего сгорания, электрические и т. д.). В этом случае управление выполняет человек, а источники энергии (двигатели) считаются исполнительными элементами. В настоящее время на этапе автоматизации управление возлагается на ЭВМ. При изучении вопросов управления вполне естественно вначале понять, как же человек управляет сам, прежде чем возлагать процесс управления на машину.

Сознательная деятельность человека всегда целенаправленна, то есть прежде, чем что-либо делать, он ставит себе цель и затем стремится ее достигнуть. Иначе говоря, стремится приблизить действительное к желаемому как можно ближе, но возникающие при этом трудности (помехи, препятствия) ему мешают. Задача достижения цели считается выполненной, когда разница между желаемым и действительным достаточно мала. Указанные соображения во многом лежат в основе управления машинами и другими объектами. Следует отметить, что не все задачи управления удается полностью поручить машине. Если часть задач решается человеком, то система называется *автоматизированной системой управления*, сокращенно **АСУ**. Если же все решается устройствами без человека, то тогда имеют место системы автоматического управления, сокращенно **САУ** [1].

Введем некоторые определения [2].

Управление – целенаправленное воздействие на объект, в результате которого он переходит в требуемое состояние. Управление рассматривается как процесс во времени.

Объект управления (ОУ) – часть окружающего нас мира, на которую можно воздействовать с определенной целью.

Состояние объекта управления – набор параметров, характеризующих его в каждый момент времени.

Успехи в области электроники, вычислительной техники (аппаратуре, программировании) и многом другом позволили внедрить автоматизацию в самые разнообразные области, от маленьких электродвигателей до глобальных систем спутниковой навигации. При этом одни системы могут входить в состав других более крупных систем. Следует оговориться, что сокращение «ОУ» также используется для обозначения операционного усилителя – широко распространенного электронного элемента.

Сама ЭВМ (компьютер) часто является объектом управления, например: управление ее тепловым режимом, система энергосбережения и т. д. Можно сказать, что она сама собой управляет. Изучая работу ЭВМ, можно узнать о новейших приемах автоматического управления с помощью ЭВМ различными объектами.

Принципы управления оказываются актуальными для объектов самой разнообразной природы – физической, биологической, общественной. Эти принципы изучает **кибернетика** – наука о связях в технике, природе и обществе [3].

Автоматизированная система управления технологическим процессом (АСУ ТП) – комплекс программных и технических средств, предназначенный для автоматизации управления технологическим оборудованием на предприятиях. Он может иметь связь с автоматизированной системой управления предприятием (АСУ П). Под АСУ ТП обычно понимается комплексное решение, обеспечивающее автоматизацию основных технологических операций на производстве в целом или каком-то его участке, выпускающем относительно завершенный продукт. Термин «автоматизированный» в отличие от термина «автоматический» подчеркивает возможность участия человека в отдельных операциях как в целях сохранения человеческого контроля над процессом, так и в связи со сложностью или нецелесообразностью автоматизации отдельных опера-

ций. Составными частями АСУ ТП могут быть отдельные системы автоматического управления (АСУ) и автоматизированные устройства, связанные в единый комплекс. Как правило, АСУ ТП имеет единую систему операторского управления технологическим процессом в виде одного или нескольких пультов управления, средства обработки и архивирования информации о ходе процесса, типовые элементы автоматики: датчики, контроллеры, исполнительные устройства. Для информационной связи всех подсистем используются промышленные компьютерные сети [1].

1.1. Управление движением суппорта станка

Рассмотрим простой, но распространенный на производстве пример, показанный на схеме (рис. 1).

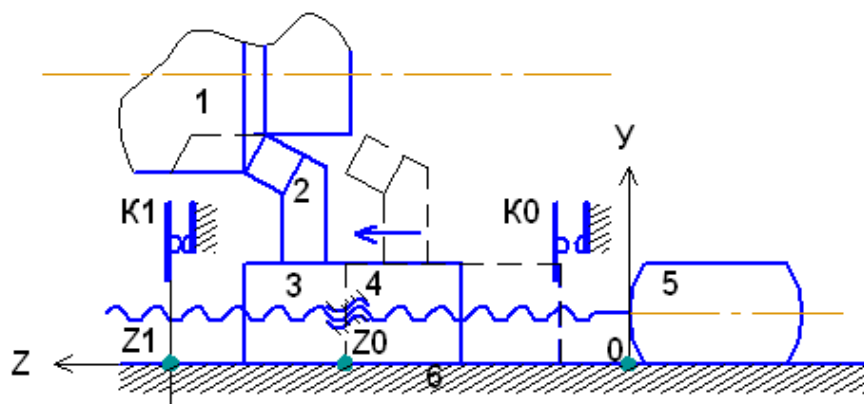


Рис. 1. Автоматическое управление движением с помощью конечных выключателей K0 и K1

Заготовка 1 протачивается резцом 2, закрепленным на суппорте 3, который перемещается влево с помощью электродвигателя 5 через механическую передачу винт-гайка 4. Все установлено на неподвижном основании 6. Требуется остановить движение суппорта в точке Z1, для чего нужно выключить электродвигатель. Положение суппорта определяется его левым краем. Конечно, токарь может это сделать вручную, перемещая суппорт штурвалом и наблюдая за движением суппорта по делениям на шкале лимба. Но если это

нужно делать очень часто, то целесообразно выключать электродвигатель автоматически с помощью конечного выключателя К1. В простейшем случае – это размыкающий электрический контакт, который разрывает электрическую цепь питания электродвигателя от прикосновения суппорта (суппорт упирается в левую упругую пластинку и отводит ее от неподвижной правой пластинки). Поскольку электродвигатель подключен к трехфазной сети напряжением 220/380 В и потребляет десятки ампер, то контакт К1 сначала отключает пускатель, который, в свою очередь, отключает электродвигатель [1]. Так как пространство, где происходит резание материала, очень загрязнено (смазывающе-охлаждающая жидкость, стружка), для повышения надежности работы в настоящее время обычно применяют бесконтактные конечные выключатели, работающие, например, на магнитном принципе.

Объектом управления в данном случае можно считать элементы 1–6. Состояние ОУ определяется одним параметром – координатой Z . Ее можно считать **управляемым параметром**. Цель управления – выключить электродвигатель в точке $Z1$, однако цель управления нуждается в уточнении. На самом деле целью является обработка заготовки от точки $Z0$ до $Z1$ при определенной скорости резания с заданной минутной подачей резца (мм/мин). Величина подачи зависит от характеристик механической передачи и электродвигателя. Часто используют асинхронный электродвигатель с короткозамкнутым ротором (наиболее распространенный тип), который связан с винтом через редуктор и с достаточной точностью обеспечивает минутную подачу.

Рассмотрим конец движения – останов резца при **значении координаты $Z1$ с определенной точностью**. Несмотря на то, что обычно суппорт идет с небольшой скоростью, он вследствие инерции останавливается не сразу после отключения электродвигателя. Кроме того, ротор электродвигателя и механическая передача тоже имеют инерцию, поэтому резец остановится несколько левее точки $Z1$. На практике для точного останова суппорта и резца применяют механический упор, устанавливаемый в точке $Z1$, а конечный выключатель эмпирически устанавливают так, чтобы он отключал электродвигатель немного раньше.

Начало движения контролируется с помощью конечного выключателя К0, который должен быть замкнут, когда суппорт находится в

точке Z0. При этом правый край суппорта упирается в левую контактную пластинку конечного выключателя K0, замыкая его, а при движении суппорта влево упругие пластинки контакта размыкаются.

1.2. Применение ЭВМ для управления движением

Рассмотрим вопрос управления движением суппорта с помощью ЭВМ, которую называют управляющей ЭВМ (УЭВМ), далее в пособии она также называется программируемым логическим контроллером (ПЛК). Но сначала вспомним способ ввода (вывода) информации в ЭВМ [10], для этого рассмотрим очень простой пример. Предположим, что родители пообещали ребенку купить давно желанную игрушку, если он будет себя вести хорошо целый день. Далее ребенок ведет себя как УЭВМ, а родители – как управляемый объект, цель управления – купить игрушку. Назавтра утром ребенок просыпается и спрашивает у матери: «Пойдем в магазин?» Мать отвечает: «Еще рано, магазин закрыт». Через пять минут ребенок снова спрашивает мать, получает такой же ответ. Это продолжается через каждые пять минут. Здесь можно представить частоту опроса $f = 12$ раз в час с периодом $T = 5$ минут. Наконец матери надоело и она говорит: «Займись-ка ты делом, посмотри книжку, я тебя позову, когда мы пойдем в магазин». Сначала активной стороной является ребенок, он начинает действие (инициирует). Это соответствует программному вводу/выводу, когда ЭВМ опрашивает в цикле флаги регистра состояния внешнего устройства, например клавиатуры, чтобы узнать, нажали ли мы клавишу, чтобы программа обслуживания клавиатуры ввела код нажатой клавиши в память. Далее активной стороной становится мать, которая инициирует действие. Это соответствует вводу/выводу по прерываниям, когда клавиатура при нажатии клавиши инициирует прерывание УЭВМ. Персональную ЭВМ нецелесообразно использовать длительно в циклах опроса, лучше дать ей работать с полезной программой, поэтому в ней обычно применяют ввод/вывод по прерываниям. Однако УЭВМ часто выполняет лишь одну функцию – управление заданным объектом, поэтому в них чаще используют программный ввод/вывод, хотя не исключены и прерывания. Кроме того, число различных датчиков может быть очень велико, – значительно больше, чем внешних

устройств. На каждый датчик потребуется свой номер прерывания, присвоение которого может оказаться затруднительным.

Важным параметром для УЭВМ является период опроса, за это время УЭВМ должна успеть выполнить программу управления объектом. В случае управления движением суппорта положим, например, что скорость V его движения (подача) равна 30 мм/мин или 0,5 мм/с, а максимальная ошибка останова должна быть $\delta = 0,05$ мм. Можно представить, что УЭВМ смотрит, сработал ли К1, чтобы предпринять дальнейшие действия, а вся работа программы управления длится время T . В наихудшем случае сразу после окончания программы срабатывает К1, поэтому программа отключит двигатель только спустя время T . Максимальная ошибка

$$\delta = V \cdot T,$$

время выполнения программы должно быть

$$T = \delta / V = 0,05 / 0,5 = 0,1 \text{ с}$$

или меньше. Из примера видно, что чем выше частота опроса (меньше T), тем точнее останов. Здесь можно выделить два случая:

1. Программа управления циклится (после окончания она тут же вновь запускается), частота опроса максимальна для УЭВМ.

2. Частота опроса задается по таймеру, тогда $T_{\text{таймера}} \geq T$; в этом случае программа инициируется прерыванием таймера.

УЭВМ квантует во времени процесс управления аналогично квантованию во времени аналогового сигнала в звуковой подсистеме ЭВМ [10], там квантование сигнала осуществляется в АЦП с частотой не менее 40 КГц. Напомним, что квантование создает неизбежную ошибку, которую необходимо учитывать.

1.3. Алгоритм управления движением суппорта

Алгоритм управления можно представить блок-схемой, изображенной на рис. 2. УЭВМ в цикле анализирует текущее значение управляемого параметра, обозначенного в общем случае $X(t)$, пока оно не станет равным исходному значению X_0 , это определяет конечный выключатель К0 своим замкнутым состоянием. Если усло-

вие выполняется, то начинается движение, которое заканчивается, когда $X(t)$ становится равным $X1$, что определяет $K1$ своим размыканием. Тогда нужно отключить электродвигатель. Вверху справа на рис. 2, б показан граф причин и следствий при реализации указанного алгоритма средствами электроавтоматики: конечными выключателями $K0$, $K1$, кнопкой пуска Π и пускателем Δ , который включает своими контактами электродвигатель на трехфазную электросеть 220/380 В.

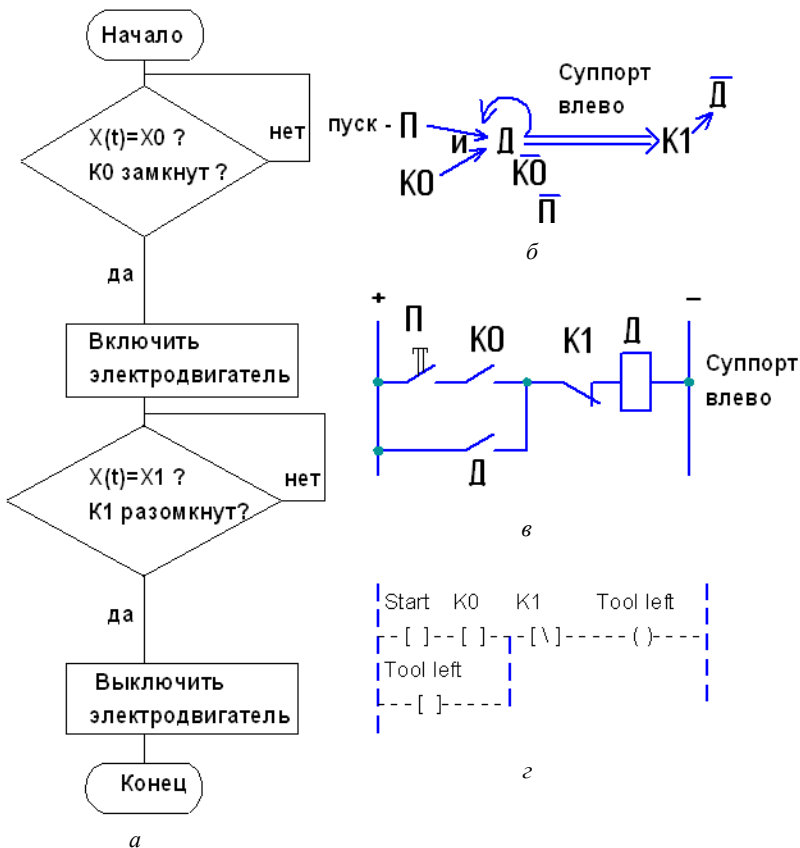


Рис. 2. Алгоритм и схема управления для рис. 1:
 а – блок-схема алгоритма; б – схема причин-следствий; в – принципиальная электрическая схема; г – исходный текст программы для программируемого логического контроллера

В принципиальной электрической схеме управления, рис. 2, в, реализован алгоритм управления согласно схемам на рис. 2, а и б. Нажим на кнопку П вызывает включение Д, так как замыкает цепь электромагнита пускателя Д, при этом должен быть замкнут конечный выключатель К0. Это обозначено на рис. 2, б буквой «И» как логический оператор (в программировании обычно «AND»). На электросхеме такой оператор реализуется последовательным включением контактов П и К0. После включения электродвигателя суппорт идет влево, хотя на схеме рис. 2, б согласно общему правилу изображения хода времени это показано как движение вправо. Как следует из конструкции механизма, рис. 1, в начале движения конечный выключатель К0 отключается, что показано на рис. 2, б чертой над К0 – общее обозначение логической инверсии. Отключается также кнопка П, с которой мы снимаем палец. Так как причины включения Д исчезают, то исчезает и само следствие. Иначе говоря, размыкание контакта П или К0 разрывает электрическую цепь Д, что вызовет отключение пускателя и электродвигателя и останов суппорта в самом начале движения. Чтобы этого не случилось, применяют очень распространенный в электроавтоматике прием, называемый «самопитанием или самоудержанием или самоблокировкой» – параллельное включение замыкающего контакта пускателя Д. На схеме рис. 2, б это изображено дужкой влево на Д. Этот прием можно также считать запоминанием или фиксацией. Окончание движения определяется выключением электродвигателя, что на схеме рис. 2, б изображено чертой над Д (\bar{D}).

Уже в течение достаточно долгого времени взамен классических цепей электроавтоматики нередко используют небольшие управляющие ЭВМ, называемые *программируемыми логическими контроллерами* (ПЛК, programmable logic controller) [1]. Управляющая программа для ПЛК обычно задается в виде набранной на клавиатуре схемы, показанной на рис. 2, г. Она является копией схемы электроавтоматики: на ней контакты изображаются квадратными скобками, причем размыкающий контакт содержит внутри косую черту; катушки электромагнитов изображаются круглыми скобками; проводники изображаются пунктиром. Такой исходный текст преобразуется транслятором, часто работающим на персональной ЭВМ, в исполнимый модуль ПЛК. Указанный язык программирования ПЛК называется языком «лестничных диаграмм – ladder dia-

gram». Принципиальная электрическая схема электроавтоматики рис. 2, в напоминает лестницу, шины питания «+, -», изображены вертикально, хотя в отечественной технической документации их изображают горизонтально.

1.4. Импульсное управление электронагревателем

Другой широко встречающийся пример – электронагреватель, в котором автоматически поддерживается температура в определенных пределах, например электроутюг. В нем объектом управления является гладкое основание, а управляемый параметр – его температура. Электрическая схема такого нагревателя приведена на рис. 3, а.

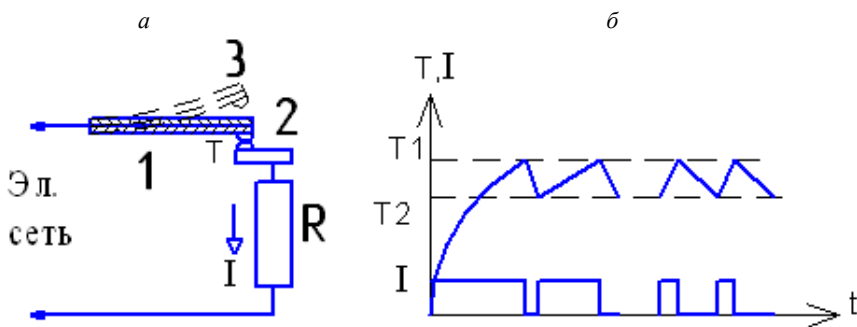


Рис. 3. Автоматическое регулирование температуры электронагревателя

Нагревательный элемент, расположенный на основании, представлен как сопротивление R , подключаемое к электросети через контакт 1, установленный на биметаллической пластинке, и неподвижный контакт 2. Биметаллическая пластинка имеет температуру основания и состоит из двух слоев различных металлов, при этом нижний слой имеет значительно больший коэффициент теплового расширения, чем верхний. После включения электронагревателя в электросеть его температура растет и вместе с этим растет температура основания и биметаллической пластинки. Пластинка постепенно искривляется и при определенной температуре T_1 разрывает контакт, отключая этим самым нагревательный элемент R . После этого температура нагревателя постепенно падает, однако при определенной температуре $T_2 < T_1$ в результате выпрямления биметаллической пластинки контакт снова замыкается, и процесс повторяется.

таллической пластинки контакт снова замыкается и снова температура начинает расти и т. д. График температуры T показан на рис. 3, б. Ниже на графике показано значение электрического тока I в цепи. Положим, что в начале процесса температура среды была ниже, поэтому нагревание шло медленнее, а остывание – быстрее. Позже температура среды стала значительно выше, соответственно длительность импульсов тока стала меньше. Далее аналогичное явление будет называться широтно-импульсной модуляцией тока, она реализуется на значительно больших частотах импульсов (например, тысячи раз в секунду).

Несмотря на различие в физических явлениях обоих приведенных примеров, в них можно найти общие черты. Это наличие объекта управления, текущее состояние которого характеризуется определенными управляемыми параметрами, в простейшем случае – одним управляемым параметром Z или T . Система управления имеет возможность изменять этот параметр с помощью исполнительного элемента: электродвигателя или электронагревателя. Имеется заданное значение управляемого параметра: Z_1 или T_1 . Первоначально текущее значение управляемого параметра $Z(t)$ или $T(t)$ не равно заданному, однако под воздействием исполнительного элемента это значение стремится к заданному. Когда текущее значение становится равным заданному $Z(t) = Z_1$ или $T(t) = T_1$, исполнительный элемент отключается, прекращая воздействовать на объект управления. Можно сказать, что управляемый объект (суппорт или основание утюга) сам себя отключает от воздействия исполнительного элемента. Можно привести много других практических примеров, где автоматические устройства работают по указанному принципу.

При более подробном рассмотрении схемы на рис. 3 обратим внимание на момент размыкания контакта, когда температура достигает значения T_1 . Если представить плавную деформацию биметаллической пластины, то при очень малом зазоре в электрическом контакте начнется искрение, что приведет к быстрому износу контакта, поэтому нужно резко разомкнуть контакт скачком (расстояния). На упрощенной схеме на рис. 3 механизм создания такого скачка не показан, обычно в качестве такого механизма используют тарельчатые пружины, «ломающиеся» рычаги и т. д. Этот механизм также обеспечивает включение контакта при температуре T_2 , например возврат тарельчатой пружины.

Идея самоотключения закладывалась в разнообразные устройства автоматического саморегулирования, изобретенные в давние времена, например в водяной бачок унитаза с поплавком, связанным с клапаном наполнения. Здесь тоже поплавок через клапан наполнения бачка при плавной работе не может окончательно себя отключить, нужен скачок, без него сочащаяся вода изнашивает этот клапан, что потребует ремонта. В рассмотренных автоматических устройствах исполнительный элемент обеспечивает изменение управляемого параметра только в одном направлении – увеличении.

1.5. Регулирование напряжения

Рассмотрим пример двустороннего воздействия на управляемый параметр: в сторону увеличения и в сторону уменьшения. Предположим, наш стол освещается лампочкой накаливания 100 Вт, 220 В. Напряжение в электросети может падать до 205 В, если кто-либо включает электроутюг, мощность которого 1000 Вт. На языке систем управления это называется случайным возмущением. При падении напряжения лампочка начинает гореть тускло, что нежелательно, поэтому нужно вернуть значение напряжения в норму 220 В. Иначе говоря, нужно устранить влияние случайных возмущений. Чтобы это можно было проделывать, применим простую схему, рис. 4, на которой 1 – лабораторный автотрансформатор, 2 – движок, 3 – вольтметр, 4 – лампочка.

Если вольтметр 3 показывает напряжение, отличающееся от 220 В, то перемещая движок 2 автотрансформатора на вольтметре добиваемся значения 220 В и сразу прекращаем дальнейшие действия. В данном случае причиной падения напряжения на лампочке было падение напряжения в электросети на входе автотрансформатора. Однако это напряжение также может упасть, если, например, параллельно лампочке подключить еще несколько лампочек. Несмотря на это, можно все равно установить требуемое значение напряжения движком 2. Если по какой-либо причине напряжение в электросети превысит 220 В, то движком того же автотрансформатора его можно понизить до 220 В. Во всех рассмотренных случаях алгоритм наших действий одинаков: наблюдаем отклонение ϵ текущего значения напряжения $U(t)$ от заданного $U_0 = 220$ В:

$$\varepsilon = U(t) - U_0.$$

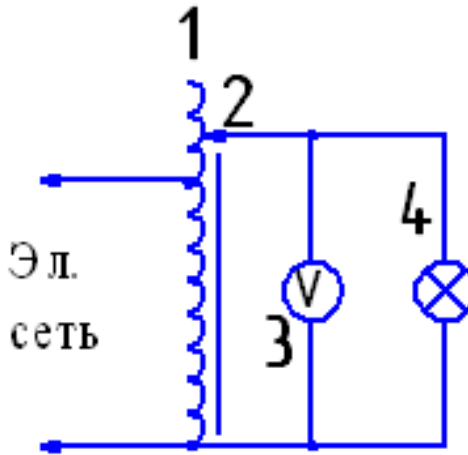


Рис. 4. Схема регулирования напряжения на лампочке.

Если отклонение положительно, то напряжение уменьшаем до тех пор, пока отклонение не станет равным нулю, аналогично при отрицательном отклонении напряжение повышаем до тех пор, пока отклонение не станет равным нулю. Таким образом, назначение регулирования – устранение влияния случайных возмущений.

Если такую регулировку напряжения нужно делать часто, то придется подумать о том, как ее проводить автоматически. Алгоритм работы такого регулятора приведен на блок-схеме рис. 5.

На рис. 6 показана аналогичная схема на постоянном токе, к которой применим алгоритм, указанный на рис. 5.

Для повышения напряжения $U(t)$ нужно уменьшать переменный резистор R2, а для его уменьшения – увеличивать R2. В электронных стабилизаторах напряжения на микросхемах, например K142ЕН5, автоматически выполняется указанный алгоритм. Он применяется в так называемых линейных системах управления с отрицательной обратной связью. Прежде чем заняться этим вопросом, полезно вспомнить, как работает один из основных элементов электронных устройств – усилитель.

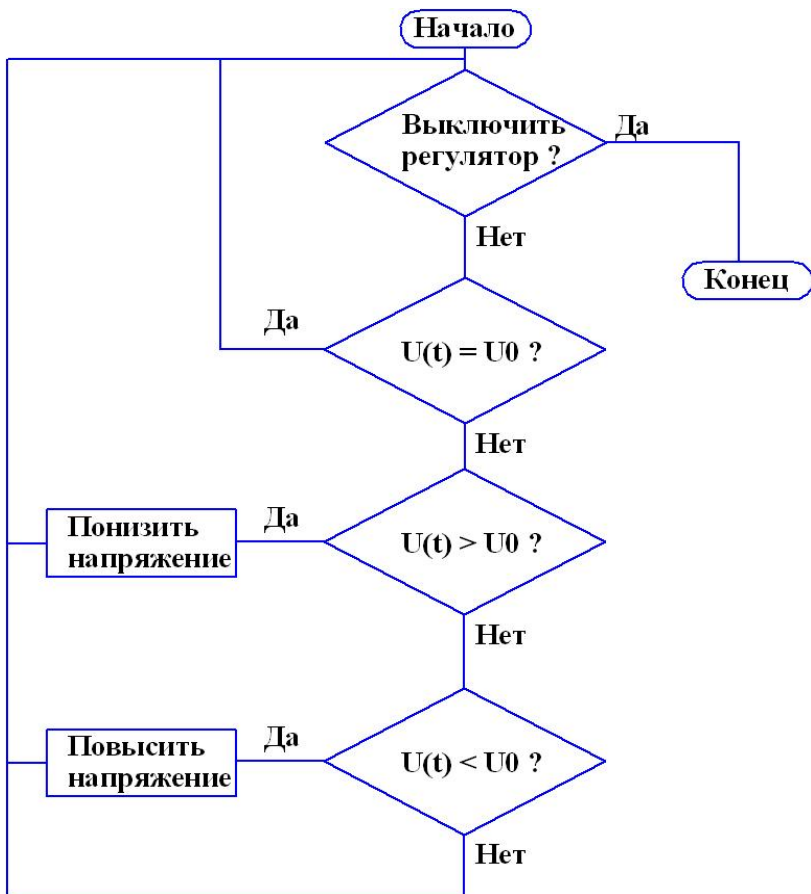


Рис. 5. Алгоритм работы регулятора

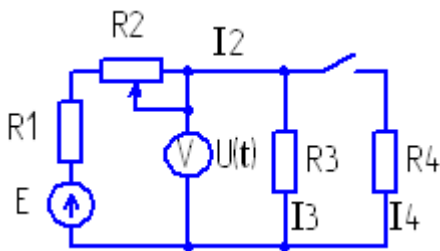


Рис. 6. Регулирование постоянного напряжения переменным резистором

2. ЭЛЕКТРОННЫЙ УСИЛИТЕЛЬ

2.1. Электронно-вакуумные приборы

Первоначально был создан электронно-вакуумный диод, схема которого показана на рис. 7, а. Его название показывает число электродов – два.

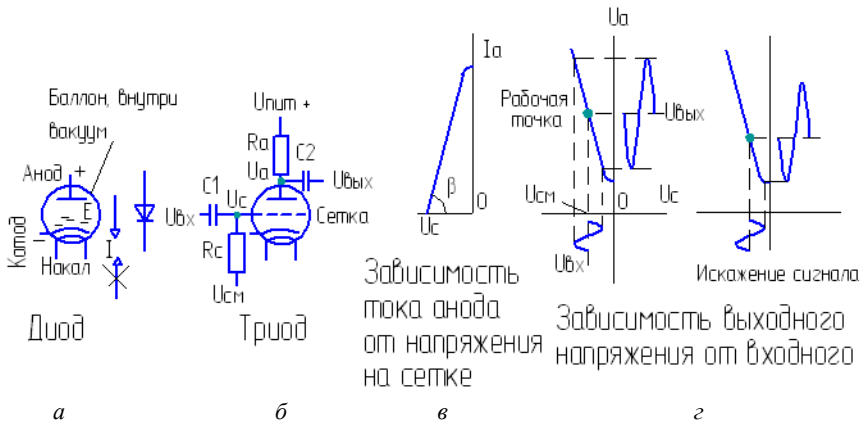


Рис. 7. Электронно-вакуумные приборы

Под действием электронагревателя, называемого накалом, катод испускает электроны (обозначенные на рис. 7 «←»). Между анодом и катодом прикладывается значительное электрическое напряжение (сотни вольт), создающее большую напряженность E электрического поля. Электроны подхватываются этим полем, устремляются к аноду и оседают на нем, создавая этим самым электрический ток I между анодом и катодом (принятое в электротехнике направление электрического тока от «плюса» к «минусу»). В обратном направлении ток через диод не протекает. На рис. 7 справа от диода изображены стрелки электрического тока и общий значок диода. Благодаря свойству проводить ток только в одном направлении диод применяется для выпрямления переменного электрического тока. Дальнейшее развитие диода привело к созданию триода, показанного на рис. 7, б. В триоде была добавлена сетка между анодом и катодом, через которую электроны вынуждены пролетать на пути от катода к

аноду. Если на сетку подать напряжение, отрицательное относительно катода, то электроны будут ею отталкиваться обратно к катоду и ток будет ослабевать. Увеличивая отрицательное напряжение, можно свести ток к нулю. И, наоборот, уменьшая это напряжение, можно увеличивать ток анода. На рис. 7, *в* показана зависимость тока анода от напряжения на сетке. Усилительные свойства триода характеризуются крутизной этой кривой

$$S = dI_a / dU_c = \operatorname{tg} \beta$$

при определенном анодном напряжении U_a . На рис. 7, *г* показан график зависимости напряжения на аноде

$$U_a = U_{\text{пит}} - R_a \cdot I_a$$

от напряжения на сетке U_c в виде наклонной линии, на которой в исходном положении нанесена рабочая точка. Если на сетку через конденсатор $C1$ подавать переменное напряжение усищаемого сигнала $U_{\text{вх}}$, то с анода через конденсатор $C2$ может быть снято увеличенное напряжение $U_{\text{вых}}$. Амплитуда выходного сигнала в $K = (S \cdot R_a)$ раз (коэффициент усиления) больше входного. Чтобы сигнал не искажался по форме, нужно работать в пределах прямолинейного участка зависимости $U_a(U_c)$, что достигается выбором положения рабочей точки путем подачи на сетку через резистор с большим сопротивлением R_c постоянного напряжения смещения $U_{\text{см}}$. Это называют режимом по постоянному току. На правом графике показан случай искажения выходного сигнала (нижняя амплитуда меньше верхней). В случае усиления звуковых сигналов будет слышно искажение звука.

На рис. 8, *а* показана очень простая схема катодного повторителя, которая не усиливает напряжение, но усиливает ток. Ее работу удобно рассмотреть на схеме с отрицательной обратной связью на рис. 8, *б*. Напряжение между сеткой и катодом, равное

$$U_c = (U_1 - U_2),$$

определяет значение тока, протекающего через R_k , аналогично R_a на рис. 7, и создает на R_k напряжение

$$U_2 = U_c \cdot S \cdot R_k = (U_1 - U_2) \cdot K.$$

При значениях коэффициента усиления K , значительно больших 1, что имеет место на практике, выходное напряжение U_2 почти равно U_1 , поэтому данная схема имеет название «катодный повторитель» (U_2 повторяет U_1).

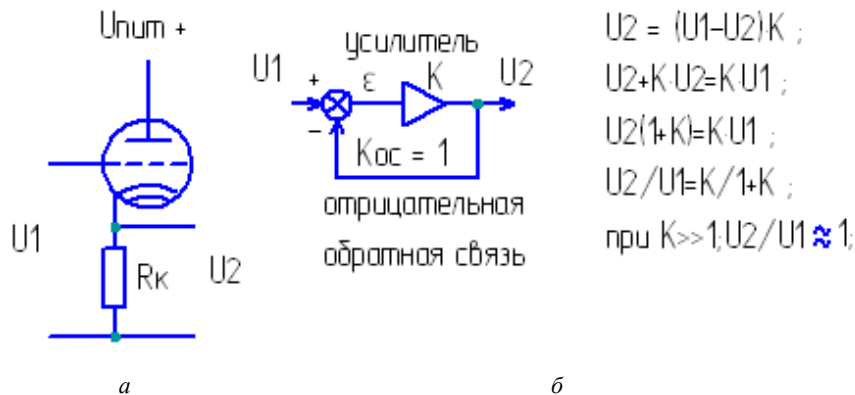


Рис. 8. Катодный повторитель

Если рассматривать катодный повторитель как систему управления, то объектом управления является резистор R_k , называемый еще электрической нагрузкой. Управляемый параметр – напряжение на нагрузке U_2 . Заданное значение управляемого параметра U_1 . Нагрузка может иметь различное сопротивление (случайные возмущения), а значение напряжения на ней должно быть постоянным, равным U_1 . Схема управления, показанная на рис. 8, б, работает следующим образом. Текущее значение управляемого параметра U_2 сравнивается с заданным значением U_1 , их разность ϵ подается на вход усилителя, который в K раз ее усиливает и подает на выход в виде U_2 и вновь это повторяется. Под обратной связью понимается связь между выходом и входом, она отрицательная, потому что ее сигнал вычитается. У положительной обратной связи сигнал складывается. Таким образом, катодный повторитель является примером очень простой линейной системы управления с отрицательной обратной связью. Название «линейная система» происходит от прямолинейного графика зависимости выхода от входа в усилителе,

когда коэффициент усиления K постоянный, вне зависимости от величины и частоты сигнала. Аналогичные зависимости существуют в линейных электрических цепях, например по закону Ома зависимость напряжения от тока на сопротивлении R линейна

$$U = I \cdot R.$$

Свойство линейности предполагает наличие констант, связывающих выходы и входы, что существенно упрощает анализ таких систем. В реальности предположение линейности является упрощением.

С конца сороковых годов прошлого века электронно-вакуумные приборы (электронные лампы) почти полностью были вытеснены полупроводниковыми приборами. Эти приборы имеют значительно меньшую стоимость, размеры, массу, энергопотребление и значительно больший срок службы. В них носители электрического тока перемещаются не в вакууме, как ранее, а в кристалле полупроводника. Многие электронные схемы, первоначально созданные на лампах, были переведены на полупроводниковые приборы.

2.2. *p-n*-переход, полупроводниковый диод

Основной материал полупроводниковых приборов – сверхчистый монокристаллический четырехвалентный кремний Si, кристаллическая решетка которого не имеет дефектов. В основных проводниках электрического тока – металлах (меди, алюминии, серебре) – электропроводность обеспечивается свободными электронами, которые расположены на удаленных от атомных ядер оболочках. Наоборот, изоляторы не имеют свободных электронов, все электроны в них сильно связаны с ядрами. Электропроводность рассматриваемых полупроводников также обеспечивается свободными электронами или их «отсутствием (так называемыми «дырками»), получаемыми путем введения в полупроводник специальных примесей. Если примесь пятивалентная (фосфор, мышьяк), то встраиваясь в четырехвалентный кремний она отдает свой пятый электрон в число свободных и тем самым создает электронную *n*-проводимость (negative). Если примесь трехвалентная (бор), то создается обратный электрону носитель электрического тока – отсутствие электрона – «дырка» (hole), соответствующая *p*-проводимости

(positive). Перескакивая в дырку из соседнего атома, электрон тем самым создает дырку в бывшем своем атоме, и дырка таким образом перемещается, перенося положительный заряд.

Предположим, имеются два отдельных бруска кремния разной проводимости, как показано на рис. 9, а.

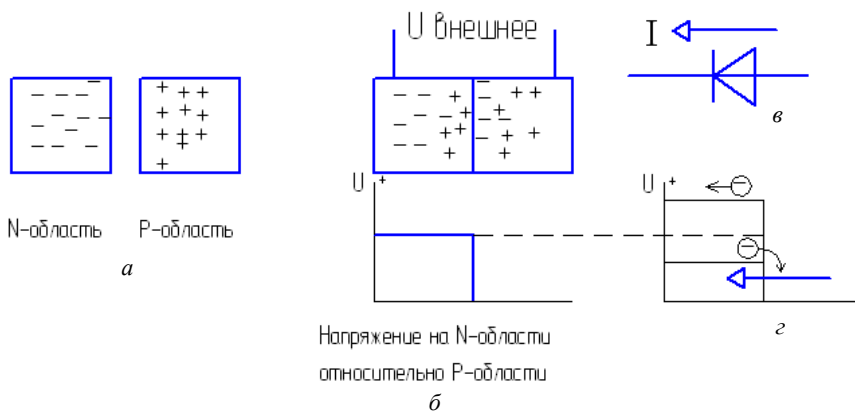


Рис. 9. *p-n*-переход

Эти бруски не имеют электрического заряда, напряжение между ними равно нулю. Если их плотно прижать друг к другу, то между ними возникнет электрическое напряжение (потенциальный барьер), как показано на рис. 9, б. Это произойдет потому, что свободные электроны в силу диффузии начнут проникать в *p*-область, а дырки начнут диффундировать в *n*-область. Однако этой диффузии будет препятствовать возникающая разница потенциалов между областями: «плюс» будет тянуть назад электроны и отталкивать дырки. Установится некоторое динамическое равновесие, как показано на рис. 9, б в центре. Если подать внешнее напряжение, как показано на рис. 9, г и понизить принудительно потенциальный барьер, дав слева «минус», а справа «плюс», то электроны хлынут слева направо, а дырки – справа налево и потечет электрический ток. Если, наоборот, повысить потенциальный барьер, то электроны отойдут налево от границы, а дырки – направо и тока не будет. Таким образом, получен полупроводниковый диод, который проводит ток справа налево и не проводит ток слева направо, как изображено на рис. 9, в.

2.3. Биполярные транзисторы

Разрез биполярного транзистора (bipolar junction transistor или BJT) схематически показан на рис. 10, а.

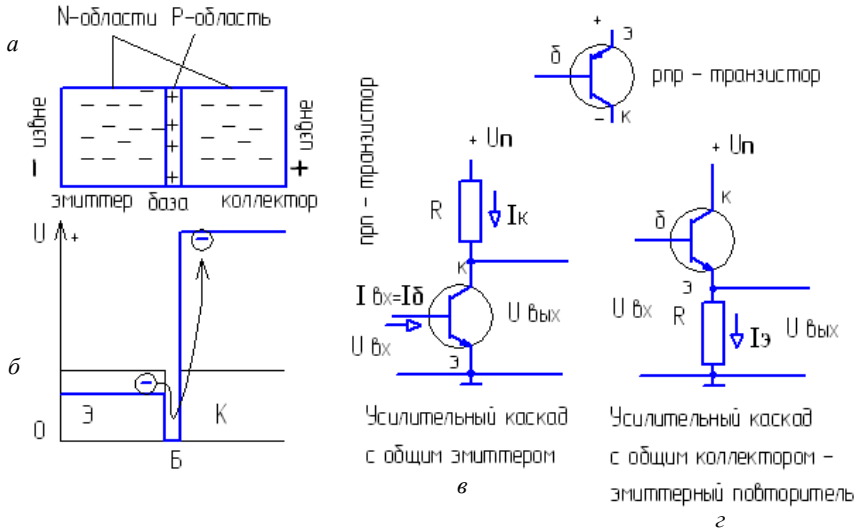


Рис. 10. Биполярный транзистор

Он образуется двумя $p-n$ -переходами, соединенными встречно. В данном случае очень тонкая внутренняя область, называемая базой, имеет p -проводимость, а весь транзистор имеет структуру $n-p-n$ (существуют также транзисторы $p-n-p$). К правому переходу прикладывается внешнее положительное напряжение, повышающее его потенциальный барьер, как показано на рис. 10, б. Тогда при понижении потенциального барьера левого перехода отрицательным внешним напряжением электроны пойдут в базу, но в силу ее очень малой толщины тут же достигнут правого перехода и будут подхвачены положительным напряжением правой области, переходя в нее. Следуя этому поведению электронов, левая область называется эмиттером, а правая – коллектором. То же самое будет и для дырок в $p-n-p$ -транзисторе.

Очень небольшая часть электронов, перешедших в базу, соединится с дырками и взаимоуничтожится (рекомбинирует), эти носи-

тели образуют электрический ток базы. Основной ток пойдет в коллектор. Наиболее распространенная схема усиления с общим эмиттером приведена на рис. 10, в. Она аналогична схеме включения лампового триода на рис. 7, при этом коллектор похож на анод, а эмиттер – на катод. Однако имеется довольно существенное отличие: в лампах работают без тока сетки, тогда как в транзисторе принципиально должен быть ток базы. Это означает, что транзистор по этой схеме имеет по сравнению с лампой низкое входное сопротивление. Приведенный на рис. 10, г эмиттерный повторитель аналогичен катодному повторителю на рис. 8. Его усиление по напряжению примерно равно 1 (нет усиления), однако входные токи базы значительно меньше, то есть входное сопротивление выше, чем в усилителе с общим эмиттером. Усилительные свойства транзистора характеризуются статическим коэффициентом передачи тока h_{21} , приводимым в справочниках для схемы с общим эмиттером. Этот коэффициент дается для определенного режима по постоянному току (напряжение между коллектором и эмиттером, ток коллектора или эмиттера) и показывает, во сколько раз ток коллектора больше тока базы (иначе – коэффициент усиления по току β).

2.4. Классы работы усилителя

Выбор рабочей точки усилителя (см. рис. 7) определяет класс работы усилителя, изображенный на рис. 11.

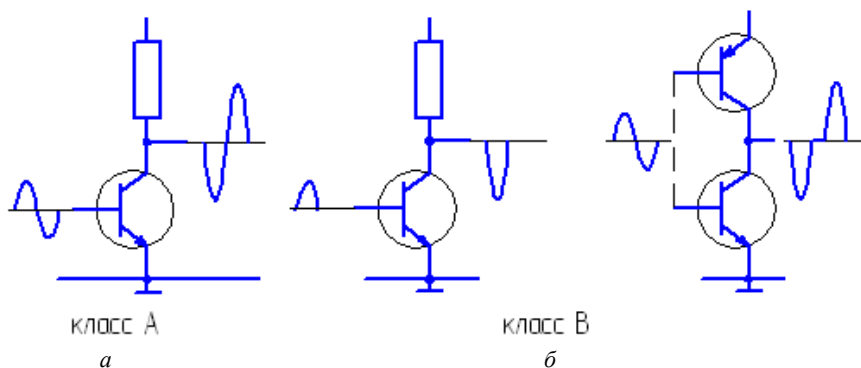


Рис. 11. Простейшие классы работы усилителя

Класс А предполагает работу всего сигнала в пределах линейной области и обеспечивает самые малые искажения сигнала, однако при низком КПД, например на приведенной схеме, в резисторе нагрузки, значительная мощность по постоянному току при большой постоянной составляющей тока теряется. Снизив постоянную составляющую тока в рабочей точке до нуля, получаем класс В. С целью дальнейшего уменьшения потерь мощности по постоянному току в коллекторном резисторе прибегают к комплементарной паре транзисторов ($n-p-n$ и $p-n-p$), включенных последовательно, как показано на рис. 11, б. Каждый из транзисторов пары работает в одном полупериоде синусоиды сигнала, как показано в центре рис. 11, во втором полупериоде он закрыт. Однако на практике трудно настроить усилитель, чтобы на выходе оба полупериода точно стыковались. На рис. 11 эта нестыковка преувеличена, что приведет к искажениям сигнала. По этой причине используется промежуточный класс АВ.

2.5. Пример звукового усилителя

На рис. 12 приведена приближенная к практике схема усилителя звуковых частот (УЗЧ) [4].

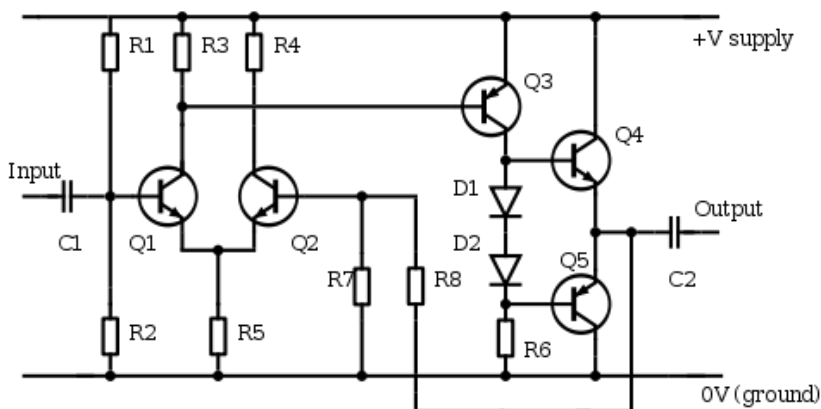


Рис. 12. Схема усилителя звуковых частот (УЗЧ) на биполярных транзисторах

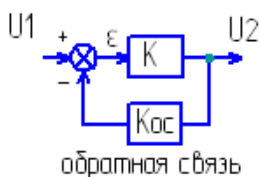
Транзисторы Q1, Q2, Q3 работают в классе А, транзисторы комплементарной пары Q4, Q5 – в классе АВ. Входной сигнал через конденсатор С1 поступает на базу Q1, рабочая точка которого задана делителем напряжения R1, R2. Эти резисторы имеют большое сопротивление и почти не ослабляют сигнал. Транзисторы Q1, Q2 образуют дифференциальный усилитель со вторым входом на базе Q2 и выходом на коллекторе транзистора Q1. Значение сигнала на этом выходе зависит от разности сигнала на обоих входах дифференциального усилителя.

Специальная цепь отрицательной обратной связи начинается с выхода усилителя и подает на базу транзистора Q2 напряжение обратной связи

$$U_{oc} = U_2 \cdot R_7 / (R_7 + R_8) = U_2 \cdot K_{oc}.$$

Здесь K_{oc} – коэффициент обратной связи.

Цепь обратной связи рассматривается как передаточное звено, имеющее на входе напряжение U_2 и выходе – напряжение U_{oc} . Отношение выхода ко входу передаточного звена будем называть *коэффициентом передачи этого звена*. Ради простоты при рассмотрении переменных напряжений и токов в качестве сигналов коэффициент передачи представляем как отношение амплитуд сигналов. Для вычисления коэффициента передачи всего усилителя воспользуемся аналогией с катодным повторителем и схемой рис. 13, аналогичной схеме на рис. 8, б. Справа на рис. 13 приведен коэффициент передачи U_2/U_1 .



$$U_2 = \varepsilon K = (U_1 - U_2 \cdot K_{oc}) \cdot K =$$

$$= U_1 \cdot K - U_2 \cdot K_{oc} \cdot K;$$

$$U_1 \cdot K = U_2 + U_2 \cdot K_{oc} \cdot K = U_2 \cdot (1 + K_{oc} \cdot K);$$

$$U_2 / U_1 = K / (1 + K_{oc} \cdot K);$$

Рис. 13. Линейная система с отрицательной обратной связью

Если $K_{oc} = 1$, то получается то же, что и для катодного повторителя на рис. 8. Для простоты представим близкое к реальности усиление первой ступени УЗЧ на транзисторах Q1, Q2, равное $K_1 = 10$, вто-

рой ступени на Q3 также $K_2 = 10$ и третьей ступени на Q4 и Q5 $K_3 = 2$. Если бы не было обратной связи (например, при наладке усилителя можно разомкнуть ее цепь), общее усиление составляло бы

$$K_{\text{разомк}} = K_1 \cdot K_2 \cdot K_3 = 10 \cdot 10 \cdot 2 = 200.$$

Тогда общее усиление с обратной связью составит

$$K = 200 / 1 + 200 \cdot K_{\text{oc}}$$

или с небольшой ошибкой, пренебрегая единицей в знаменателе:

$$K = 1 / K_{\text{oc}}.$$

То есть коэффициент усиления по напряжению всего усилителя практически полностью зависит от коэффициента обратной связи K_{oc} . Если, например, $K_{\text{oc}} = 1/20$, то $K = 20$, то есть обратная связь снижает усиление в 10 раз. Это можно получить, если убрать одну ступень усиления – усилитель станет проще и экономичнее. Зачем же тогда вводится обратная связь? Это делается для уменьшения искажений усилителя, которые вносятся главным образом выходной ступенью. Ее основное назначение – усиление сигнала по мощности. Учитывая, что нагрузкой усилителя является громкоговоритель с небольшим сопротивлением (порядка 4 Ом), выходная ступень работает со значительными токами в классе АВ, близком к В, что связано с искажениями, изображенными на рис. 11, б. Как было показано выше, коэффициент передачи всего усилителя почти полностью определяется коэффициентом передачи цепи обратной связи, а ее выполняют на пассивных линейных элементах – резисторах, конденсаторах, катушках индуктивности. Они не вносят нелинейных искажений, но уменьшают сигнал:

$$K_{\text{oc}} \leq 1.$$

Это вполне допустимо, например, в катодном повторителе $K_{\text{oc}} = 1$, а в усилителе на рис. 12 $K_{\text{oc}} = 1/20$. Доля выходной ступени, дающей искажения, в общем усилении по напряжению здесь невелика, всего лишь 2, основную долю усиления 100 дают первые две ступени, в 50 раз больше. Эти первые ступени практически не вно-

сят искажений в сигнал, обратная связь, снижая усиление в 10 раз, существенно снижает искажения. Таким образом, отрицательная обратная связь – очень эффективное средство уменьшения искажений усилителя и поэтому с этой целью применяется очень широко.

2.6. Условия возникновения самовозбуждения

При разработке нового усилителя часто возникает такая ситуация, что включают экспериментальный образец усилителя (на первых этапах макет) и из громкоговорителя слышат сильное гудение, или треск, или шум, возникающие самопроизвольно даже при отсутствии сигнала на входе. Это означает, что усилитель самовозбудился, он работает как генератор колебаний. Причиной такого самовозбуждения обычно является положительная обратная связь в усилителе, которая помимо желания разработчика может возникнуть через различные каналы, в том числе различные емкостные связи, обусловленные ошибками монтажа, через питание и т. д. То же самое относится к системам управления с обратной связью, которая иногда из отрицательной становится положительной. Это относится к проблеме устойчивости системы.

Положительная обратная связь не всегда вредна, она, например, используется в различного рода генераторах колебаний, в том числе и в тактовом генераторе ЭВМ. Пример простого генератора импульсов с положительной обратной связью показан на рис. 14 [5].

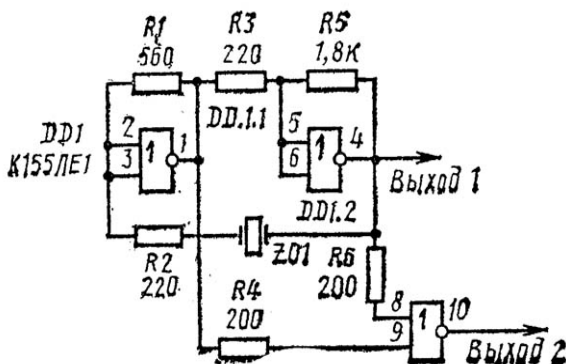


Рис. 14. Генератор импульсов с положительной обратной связью через кварцевый резонатор Z01 и резистор R2

Две логические ячейки DD.1.1 и DD.1.2 включены как простые инверторы, каждый из них поворачивает фазу сигнала на 180° , поэтому фаза сигнала на выходе 4 ячейки и фаза сигнала на входах 2, 3 совпадают. Эти точки связаны цепью положительной обратной связи через кварцевый резонатор Z01 и резистор R2. Частотные свойства кварцевого резонатора таковы, что он пропускает сигнал на своей резонансной частоте. Для устойчивой работы генератора нужно, чтобы в контуре DD.1.1, R3, DD.1.2, Z01, R2 сигнал не затухал, то есть коэффициент передачи был не менее 1.

Помимо тактового генератора в ЭВМ один из основных элементов памяти – триггер – тоже не сможет работать без положительной обратной связи. Он не работает как генератор, а положительная обратная связь заставляет его очень быстро перейти в одно из двух крайних состояний.

Чтобы понять природу самовозбуждения через положительную обратную связь, обратимся к рис. 15, который можно считать продолжением рис. 13.

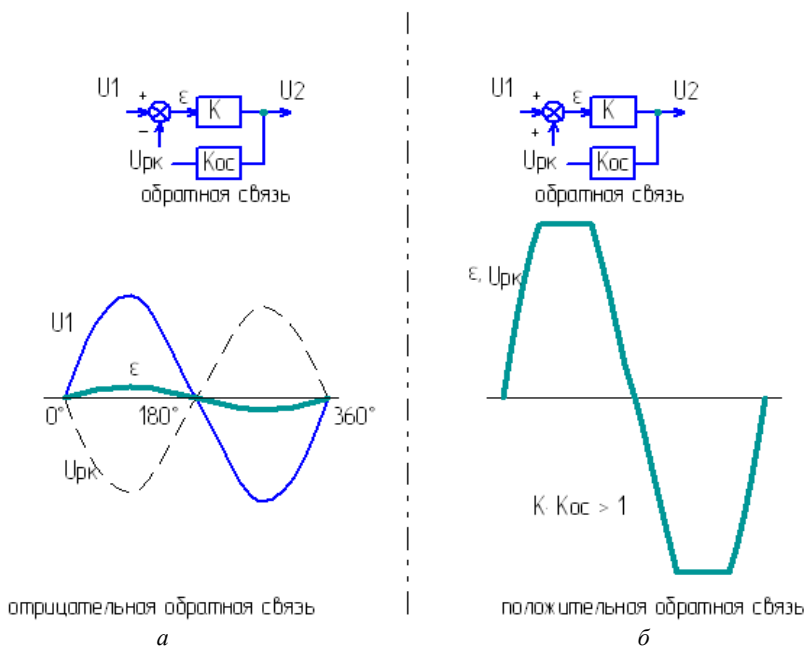


Рис. 15. Самовозбуждение системы из-за положительной обратной связи

Для удобства цепь обратной связи разомкнута. На рис. 15, *а* показан случай отрицательной обратной связи, когда знаки напряжения U_1 и напряжения, приходящего на вход по обратной связи $U_{\text{рк}}$ (напряжения разомкнутого контура), противоположны. На рис. 15, *б* показан случай, когда знаки этих напряжений одинаковы. Можно представить, что при входном сигнале $U_1 = 0$ на входе усилителя K случилось очень небольшое возмущение сигнала (например внешняя наводка), сигнал усиливается и по обратной связи поступает с выхода усилителя на его вход, снова усиливается, снова поступает на вход и снова усиливается и т. д. Этот процесс нарастания сигнала происходит, если коэффициент передачи разомкнутого контура

$$K_{\text{рк}} = K \cdot K_{\text{ос}} > 1.$$

Процесс нарастания прекращается из-за насыщения системы, работа усилителя выходит за пределы линейной области, коэффициент передачи $K_{\text{рк}}$ становится равным 1, и такое состояние возбуждения сохраняется.

Похожий процесс самовозбуждения можно иногда наблюдать в зале, где перед речью оратора включают усилитель с микрофоном и громкоговорителями. Самопроизвольно возникает гудение громкоговорителей, которое приходится устранять снижением $K_{\text{рк}}$, например закрывая микрофон (уменьшение $K_{\text{ос}}$) или уменьшая усиление K усилителя.

Сигналы различных частот при своем прохождении по цепям с емкостями создают различные сдвиги фазы, как показано на рис. 16, и различные коэффициенты передачи. Это приводит к тому, что положительная обратная связь может произойти на отдельных частотах. Тогда колебания этих частот будут генерироваться системой.

Условия самовозбуждения:

- фаза сигнала, поступающего с выхода на вход по обратной связи, должна совпадать с фазой сигнала на входе;
- коэффициент передачи сигнала в разомкнутом контуре должен быть больше 1, как показано на рис. 15, *б*:

$$K_{\text{рк}} = K \cdot K_{\text{ос}} > 1.$$

Попутно отметим, что коэффициент передачи U_2 / U_1 цепи СР (рис. 16) уменьшается с уменьшением частоты f сигнала. По этой

причине снижается коэффициент передачи всего усилителя, как, например, на рис. 12.

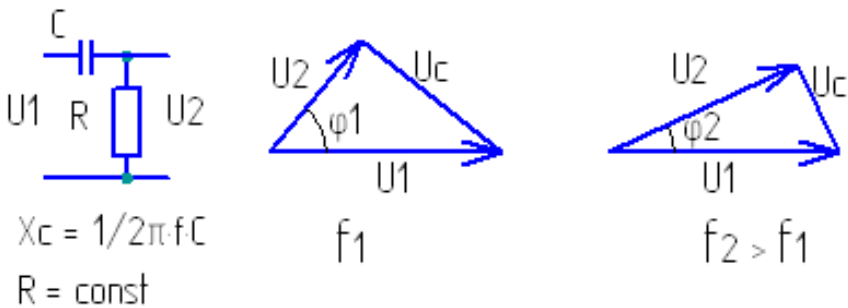


Рис. 16. Изменения фазы φ выходного сигнала U_2 в зависимости от его частоты f

2.7. Основные показатели усилителя

2.7.1. Усиление (gain)

Отношение выходной мощности усилителя ко входной традиционно задается [1] в логарифмической величине – децибел:

$$G(\text{dB}) = 10 \log(P_{\text{out}} / P_{\text{in}}).$$

Переход к логарифмическим функциям можно обосновать рядом причин:

1) возможностью на сравнительно небольшом пространстве графика показывать большой диапазон значений величин; ниже показано два графика: первый – с равномерной шкалой, второй – с логарифмической (рис. 17);

2) операции умножения коэффициентов можно заменять операцией сложения, как, например, на логарифмической линейке, которая в прошлом очень часто использовалась инженерами для вычислений, но была заменена калькулятором и ЭВМ;

3) логарифмической зависимостью ощущения громкости звука от звукового давления, например при увеличении звукового давления в два раза мы ощутим увеличение громкости в 0,3 раз [6], здесь берется логарифм без множителя 10.

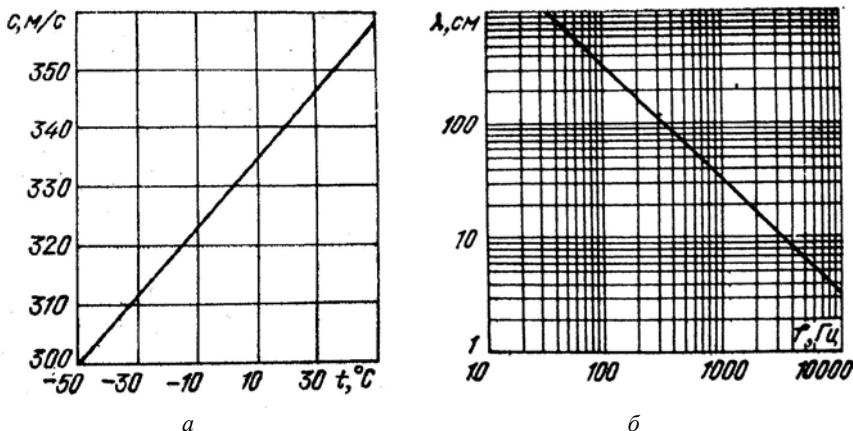


Рис. 17. Некоторые параметры звуковых волн в воздухе:
a – зависимость скорости звука в воздухе от температуры для нормального атмосферного давления 101 325 Па; *б* – зависимость длины волны в воздухе от частоты при 20 $^{\circ}\text{C}$ и нормальном атмосферном давлении 101 325 Па

Децибелы можно представить как десятичный логарифм отношения чисел, увеличенный в 10 раз. Некоторое представление об этом дает табл. 1.

Таблица 1

Значения децибел G для некоторых значений отношения K двух чисел

K	10^{-2}	0,1	0,25	0,5	1	1,5	2	3	4	5	10	10^2	10^3	10^4
$G(\text{dB})$	-20	-10	-6	-3	0	1,76	3	4,7	6	7	10	20	30	40

Поскольку мощность $P = U^2 \cdot R$, то при задании усиления по напряжению в децибелах справедлива формула

$$G(\text{dB}) = 10 \log(P_{\text{out}} / P_{\text{in}}) = 10 \log(U_{\text{out}}^2 \cdot R / (U_{\text{in}}^2 \cdot R)) = \\ = 20 \log(U_{\text{out}} / U_{\text{in}}).$$

Можно задавать коэффициент усиления и как обычное отношение не в децибелах.

Позже усиление будет рассмотрено более подробно, так как зависимость выхода от входа для различных частот сигнала оказыва-

ется значительно сложнее (амплитудно-частотные и фазочастотные характеристики).

2.7.2. Ширина полосы пропускания (частотный диапазон – bandwidth)

Здесь обычно задаются минимальная и максимальная частоты, в пределах которых коэффициент усиления по мощности изменяется не более чем на 3 дВ (в два раза) вверх и вниз от заданного значения усиления. Средний усилитель звуковых частот имеет диапазон от 20 Гц до 20 кГц (диапазон нормального слуха). Высококачественные усилители имеют более широкий диапазон частот на уровне 3 дВ.

2.7.3. Коэффициент полезного действия (КПД–efficiency)

Коэффициент полезного действия показывает, какая доля затрачиваемой энергии переходит в выходной сигнал. Усилители класса А имеют низкий КПД (10–20 %). В этом классе обычно усиливают только напряжение сигнала (на схеме рис. 12 первые два ступени усиления), поэтому низкий КПД не приводит к большим потерям энергии. Важен КПД последней ступени, здесь работают в классе АВ (КПД 35–55 %), класс В дает большие искажения. Усилители класса D имеют КПД около 90 %. Они относятся к импульсным усилителям (switching amplifier), в них транзисторы работают в ключевом режиме на частоте, которая значительно выше частоты усиливаемого сигнала (это рассматривается в дальнейшем). Высокий КПД усилителя связан с его малым нагреванием, как и для компьютера.

2.7.4. Линеиность (linearity)

Чем выше линейность, тем меньше искажения (см. рис. 7, в, г). Линейность обеспечивается при небольшой амплитуде сигнала, по мере ее роста достигается край линейной области, после чего начинается срезание сигнала (clipping). В усилителе может быть предусмотрено автоматическое ограничение коэффициента усиления, предотвращающее выход в нелинейную область. Для улучшения линейности традиционно используются отрицательная обратная связь (см. рис. 13) и другие средства.

2.7.5. Шум (*noise*)

При отсутствии сигнала на входе усилителя на его выходе обычно имеется некоторый сигнал шума, вызванный внутренними шумами транзисторов, пульсацией питающего напряжения, недостаточной фильтрацией в импульсных усилителях и т. д.

2.7.6. Выходной динамический диапазон (*output dynamic range*)

Выходной динамический диапазон задается в децибелах как отношение максимального полезного сигнала на выходе к минимальному, максимальный ограничивается искажениями, а минимальный – шумом:

$$DR(\text{dB}) = 10 \log (S + N) / N,$$

где DR – динамический диапазон;

S – мощность максимального неискаженного сигнала на выходе;

N – максимальная мощность шума на выходе.

3. СКВОЗНОЙ АКУСТИЧЕСКИЙ ТАКТ

Рассмотрим полную задачу записи и воспроизведения звука с помощью ЭВМ, как показано на рис. 18 [10].



Рис. 18. Схема звукового тракта акустической подсистемы

Слева в микрофон поступает звук, справа из громкоговорителя его слушают. Необходимо добиться максимального совпадения обоих звуков, разница между этими звуками является искажением звука. Высокое качество звука означает минимальные искажения и называется высокой верностью воспроизведения (high fidelity – HF). Поскольку этот вопрос непростой, обратимся сначала к свойствам самого слушателя.

Схема внутреннего уха человека, так называемой улитки, в развернутом виде показана на рис. 19 [6]. Ее можно представить как рупор, для компактности свернутый наподобие музыкальной трубы (волторны). Улитка состоит из отдельных волокон, каждое из которых колеблется, отзываясь на звук определенной частоты (резонирует).

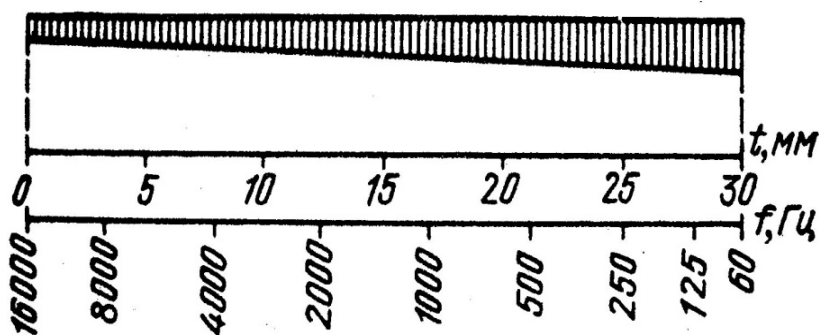


Рис. 19. Свойства слуха человека.
Продольный разрез улитки вдоль основной мембраны

На рис. 19 показаны резонансные частоты волокон (f , Герцы) в зависимости от расстояния от начала улитки (t , мм). Колебания каждого волокна раздражают свое нервное окончание, которое посылает сигналы в мозг человека. Всего этих окончаний более 20000. Эти сигналы анализируются в мозгу, создавая слуховые восприятия. Можно представить, что наше ухо разлагает звук на отдельные колебания определенных частот. Воспринимаемый слухом частотный диапазон составляет от 16–20 до 20 000 Гц. В этом диапазоне человек запоминает 100–150 градаций частоты. Наш слух очень тонко воспринимает малейшие изменения звука, которые даже трудно воспринять и создать приборами, например, звуки электронных музыкальных инструментов пока еще существенно уступают по красоте акустическим музыкальным инструментам, не говоря уже о голосе человека.

Аналогично сказанному о внутреннем ухе, при математическом анализе звуковых колебаний их представляют в виде суммы отдельных синусоидальных функций (гармоник), каждая из которых имеет свою амплитуду, частоту и фазу. Это соответствует разложению исходной функции в ряд Фурье [7]. Напряжение на выходе микрофона, воспринимающего звук, описывается формулой

$$U(t) = \sum_{i=1}^n A_i \cdot \sin(i \cdot \omega \cdot t + \Psi_i),$$

где $U(t)$ – текущее значение напряжения на выходе микрофона;

t – время;

ω – угловая частота первой гармоники;

i – номер составляющего гармонического (синусоидального) колебания (гармоники);

n – максимальный номер;

A_i – амплитуда гармоники;

Ψ_i – начальная фаза гармоники.

Считается, что фазу гармоники человек не воспринимает при оценке тембра звука, так как фаза звука используется для определения направления источника звука (бинауральный эффект). Одна и та же звуковая волна поступает в оба уха человека с некоторым сдвигом во времени, так как наши уши разнесены на расстояние

более 10 см. Этого достаточно, чтобы сдвиг по фазе звуковых сигналов воспринимался в обоих ушах. Далее наша нервная система создает у нас чувство направления на источник звука, иногда приходится поворачивать голову, чтобы точнее определить место источника звука. При этом на низких частотах при длинах звуковых волн, значительно больших расстояния между нашими ушами, разница по фазе между обоими звуковыми сигналами в каждом ухе невелика. Поэтому местоположение источника низких звуков определить значительно труднее, чем высоких. Это используется в объемных акустических системах для экономии низкочастотных каналов, особенно низкочастотных громкоговорителей (subwoofer). Можно иметь только один мощный низкочастотный громкоговоритель и несколько среднечастотных (woofer) и высокочастотных (tweeter) громкоговорителей.

Акустическое оформление громкоговорителей

Хотя все элементы звукового тракта влияют на качество звука, следует выделить громкоговоритель и его акустическое оформление (попросту ящик). Это называется колонкой. На рис. 20, *a* показана схема работы динамического громкоговорителя и так называемое акустическое короткое замыкание. Звуковые волны создаются колебаниями конической мембраны диффузора, приводимого в движение звуковой катушкой, по которой протекает переменный ток звуковой частоты. Этот ток описывается вышеприведенной суммой синусоид и поступает из усилителя. Катушка расположена в постоянном магнитном поле.

Движение диффузора вправо создает повышенное звуковое давление, распространяющееся в пространство правее громкоговорителя в виде звуковой волны. Однако слева от диффузора создается пониженное звуковое давление, куда легко переходит сжатый воздух справа, огибая край диффузора. Это явление по краям диффузора называется акустическим коротким замыканием, оно существенно снижает излучение звука громкоговорителем. Как показано в середине рис. 20, для устранения акустического короткого замыкания громкоговоритель помещают в ящик. В этом случае путь воздуха, огибающего диффузор, увеличивается в соответствии с размерами ящика. Чем больше ящик, тем лучше излучаются звуки, особенно

низких частот. Здесь проявляется свойство волн огибать препятствия, соизмеримые с длиной волны. Например, на частоте 100 Гц длина звуковой волны (в воздухе) составит примерно 3 м (см. рис. 17). Открытый ящик с размерами $1 \times 1,2 \times 0,6$ м хорошо излучает звук различных частот. Для уменьшения размеров ящика его закрывают, как показано на рис. 20, в, тогда воздух вовсе не может войти с тыла диффузора. Однако при этом затрудняются колебания диффузора из-за сжатия воздуха в закрытом ящике. Поэтому в ящике устраивают небольшое отверстие с трубкой (фазоинвертор).

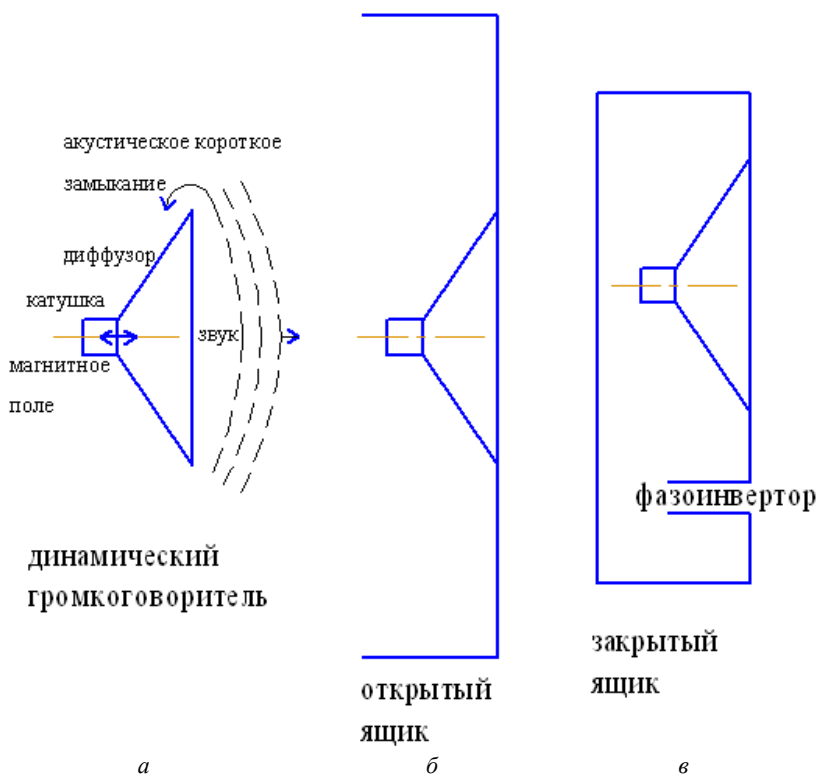


Рис. 20. Громкоговоритель и его акустическое оформление

Зависимость коэффициента передачи сигнала от его частоты называется амплитудно-частотной характеристикой (АЧХ). Она позволяет более детально проанализировать качество акустической

системы. На рис. 21 приведен пример АЧХ для активных колонок (внутри колонки имеется усилитель) типа Defender Mercury 45 [8].

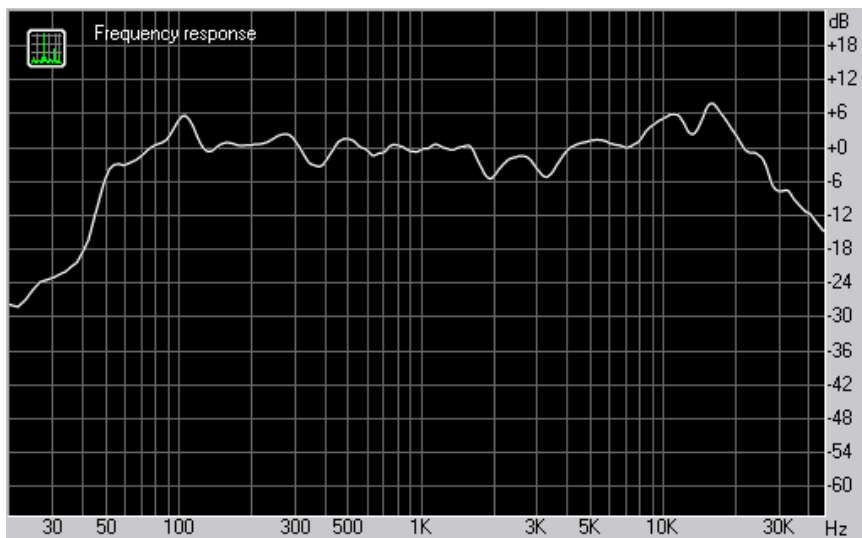


Рис. 21. Амплитудно-частотная характеристика активных колонок Defender Mercury 45

Краткие выводы из этого графика: неравномерность АЧХ составляет ± 6 дБ (в четыре раза от середины по обе стороны) в диапазоне 50–27000 Гц. Следует отметить, что на частотах ниже 50 Гц коэффициент передачи существенно падает (завал низких частот), что соответствует общей проблеме на низких частотах, как показано на рис. 20.

4. ПОЛЕВЫЕ ТРАНЗИСТОРЫ (FIELD EFFECT TRANSISTORS – FET)

На рис. 22 показано в плане два полевых транзистора на кремниевой пластине (подложке). Квадраты по ее краям – контактные площадки, Gate соединено с затвором, а S/D – Source/Drain соединено со стоком/истоком [1].

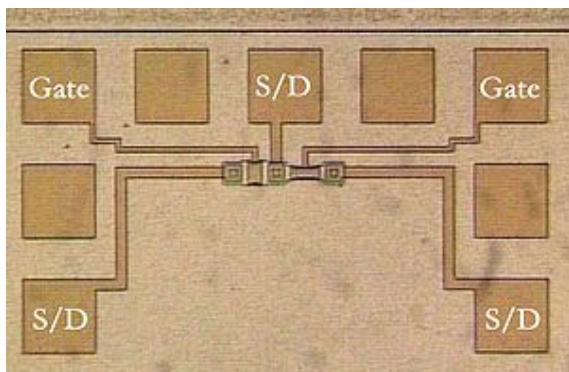


Рис. 22. Микрофотография двух МОП-транзисторов, S/D – source/drain (исток/сток), Gate (затвор)

На рис. 23, *а* схематично показан разрез полевого транзистора, типа «металл-окисел-полупроводник» (МОП) или Metal-Oxide-Semiconductor (MOS) который наиболее распространен в цифровых схемах (в том числе в компьютерах). На рис. 23, *б* сверху показано его условное графическое обозначение. На подложке *p*-типа очень близко друг от друга (на расстоянии десятков нанометров) создаются две *n*-области с электронной проводимостью, названные «исток и сток (source, drain)». К этим областям подведены металлические проводники (густая штриховка). Область между истоком и стоком покрыта тонким слоем изолятора, обычно окисью кремния (редкая штриховка), поверх которого нанесен проводящий затвор (gate), см. рис. 23, *а*.

Если между затвором и подложкой постепенно увеличивать положительное напряжение, как показано на рис. 23, *а*, то сначала из-под затвора в подложке уйдут дырки. Но при дальнейшем росте положительного напряжения выше некоторого порогового значения

из n -областей в подложку начнут поступать электроны, образуя под затвором проводящий n -канал. Толщина этого канала, а значит, и сопротивление между истоком и стоком зависят от величины положительного напряжения на затворе. В цифровых схемах транзисторы работают в ключевом режиме: либо это сопротивление очень мало (ключ замкнут), либо очень велико (ключ разомкнут). Рассмотренный транзистор имеет n -канал. В нем между стоком и истоком включается напряжение питания «плюсом» к стоку и «минусом» к истоку, как показано на его условном обозначении на рис. 23, б. Ниже этого схематически показан ключ, размыкающийся при понижении напряжения на затворе ниже порога и замыкающийся при повышении этого напряжения.

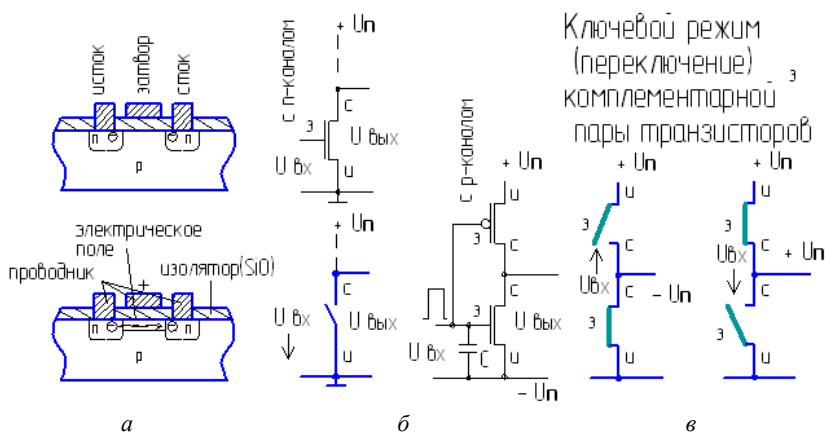


Рисунок 23. Полевой МОП-транзистор в интегральных цифровых схемах

Существуют также транзисторы с p -каналом, в которых используется подложка с n -проводимостью, а канал под затвором между двумя p -областями образуется при отрицательном напряжении на затворе, создавая замкнутый ключ. В цифровых интегральных схемах транзисторы с n - и p -каналом соединяются последовательно, образуя дополняющие (комплементарные – complementary) пары, как показано на рис. 23, б. Сверху включен МОП-транзистор с p -каналом (он имеет на затворе маленький кружок – символ инверсии). При повышении входного напряжения $U_{вх}$ нижний ключ замыкается (транзистор открывается), а верхний ключ размыкается

(транзистор запирается). Наоборот, при понижении $U_{вх}$ нижний ключ размыкается, а верхний замыкается. В установившемся состоянии комплементарная пара не потребляет от источника питания $U_{п}$ почти никакого тока, не создавая нагревания и не нагружая источник питания. Это очень важно для многих современных интегральных схем, содержащих миллионы транзисторов, как, например, процессоры. Ток потребляется только при переключении для зарядки электрических емкостей проводников в изоляции, например затвор и подложка, разделенные слоем изолятора, образуют конденсатор C (показан на рис. 23, б). Рассмотренный полевой транзистор относится к транзисторам с изолированным затвором и индуцированным каналом. Выпускаются также полевые транзисторы со встроенным каналом. Во многом их поведение аналогично ранее сказанному, поэтому для простоты мы их не выделяем.

На рис. 24 показаны логические ячейки на комплементарных МОП-транзисторах с двумя входами, они выполняют логические функции ИЛИ-НЕ (NOR) и И-НЕ (NAND).

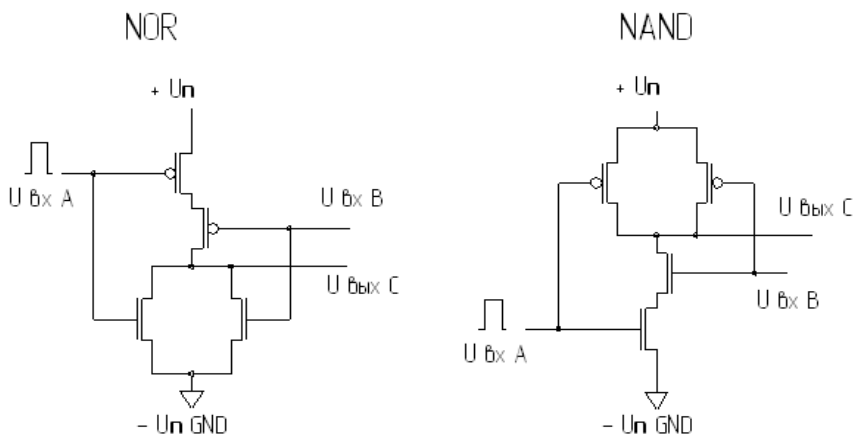


Рис. 24. Логические ячейки NOR и NAND на МДП-транзисторах

Логическая единица у них высокая, то есть «0» – низко (земля, ground – GRD), «1» – высоко, сигнал в виде положительного импульса показан на входе А. Если положить, что на обоих входах А и В низко у ячейки NOR (левой), то оба нижних МОП-транзистора с n -каналом закрыты, а верхние два последовательно соединенных

транзистора с p -каналом открыты, поэтому на выходе С высоко (логическая «1»). Если на вход А ячейки NOR подать высоко (логическая «1»), то левый нижний транзистор откроется, а самый верхний транзистор соответственно закроется и на выходе станет низко (логический «0»). То же самое будет, если подать «1» на вход В или сразу на оба входа А и В. Аналогично можно проанализировать правую ячейку NAND, результаты такого анализа показаны в таблице истинности (табл. 2).

Таблица 2

Таблица истинности ячеек NOR и NAND

Вход А	Вход В	Выход ячейки NOR	Выход ячейки NAND
0	0	1	1
0	1	0	1
1	0	0	1
1	1	0	0

Существуют также полевые транзисторы с управляющим p - n -переходом в затворе. Здесь применяется прием создания изоляции с помощью p - n -перехода, смещенного обратным напряжением (повышающим потенциальный барьер). В этом случае диод p - n -перехода включен в обратном направлении и не проводит ток. Схематический разрез такого транзистора показан на рис. 25, а, для случая n -канала. Повышение напряжения на затворе вследствие высокого обратного сопротивления p - n -перехода затвора практически не создает тока затвора. Оно отталкивает дырки в подложке между истоком и стоком, но привлекает электроны, создающие токопроводящий канал. Такой полевой транзистор аналогичен электронно-вакуумному триоду (см. рис. 7), и схема его включения также аналогична, она приведена на рис. 25, б. На рис. 25, в показан полевой транзистор с p -каналом, в нем полярности питания и смещения меняются на противоположные. Полевые транзисторы создают значительно меньший шум, чем биполярные, поэтому их применяют в первых (входных) каскадах усилителей, где сигнал мал, например, на выходе микрофона. Усилительные свойства полевых транзисторов задаются параметром «крутизна характеристики», mA/V , – изменение тока исток-сток в миллиамперах на изменение напряжения исток-затвор – в вольтах (это аналогично электронным лампам), например 8 mA/V для полевых транзисторов типа 2П 305.

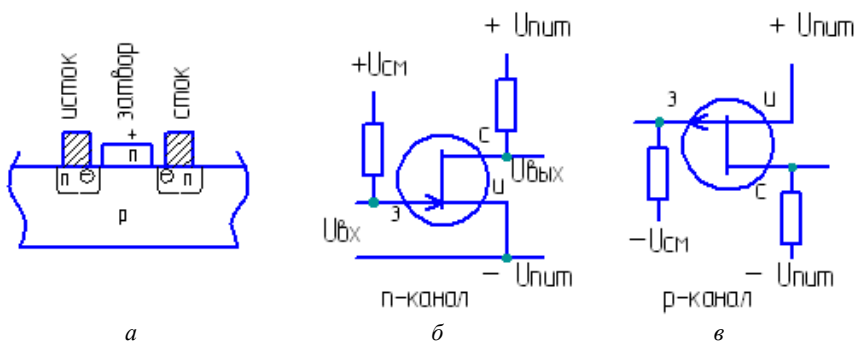


Рис. 25. Полевой транзистор с управляющим p - n -переходом:
 б – с n -каналом, в – с p -каналом

Полевые транзисторы всех типов имеют высокое входное сопротивление, значительно большее, чем биполярные транзисторы. По этой причине входные токи у них очень малы, что не нагружает источники сигнала. Это свойство позволяет работать с малыми токами и соответственно с малым потреблением энергии, что снижает нагревание и потребление энергии от источников питания. В больших интегральных цифровых схемах, таких как процессоры, это особенно ценно. Кроме того, для цифровых схем создается дополнительная свобода проектирования, так как выход одного элемента можно подключать на входы многих других элементов (разветвление сигнала – fan out). Необходимо отметить, что кружок в условном графическом обозначении транзистора изображает оболочку (защитный корпус), как на рис. 12 и 25. В интегральных схемах имеется общая оболочка для многих транзисторов, поэтому для отдельных транзисторов кружки не ставятся, как, например, на рис. 24.

5. ЛИНЕЙНЫЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ С ОТРИЦАТЕЛЬНОЙ ОБРАТНОЙ СВЯЗЬЮ

5.1. Блоки питания с непрерывным регулированием

Для питания ЭВМ требуются постоянные напряжения 12 В, 5 В и ниже с допустимым отклонением в несколько процентов при значительных токах, что обеспечивается блоком питания. Поскольку напряжение первичного источника питания – электросети – внезапно изменяется в значительно больших пределах, чем несколько процентов, приходится применять систему стабилизации напряжения, построенную по принципу линейной системы управления с отрицательной обратной связью, как показано на рис. 13. Алгоритм работы такой системы был показан на рис. 5.

Принцип регулирования напряжения на постоянном токе иллюстрировала электрическая схема на рис. 6, в которой нужно было по показаниям вольтметра вручную изменять сопротивление переменного резистора. Для автоматической работы по схеме на рис. 13 необходим усилитель постоянного тока. По сравнению с ранее рассмотренным УЗЧ, у которого нижняя частота полосы $f_{\min} = 20$ Гц, в усилителе постоянного тока нижняя частота полосы $f_{\min} = 0$, поэтому в нем не используют конденсаторы для передачи сигнала. Так как их сопротивление постоянному току бесконечно (теоретически), приходится использовать непосредственно проводные связи (гальванические). Полупроводниковые элементы позволяют достаточно легко создавать такие связи благодаря использованию комплементарных транзисторов, как, например, показано на рис. 12. В качестве усилителей постоянного тока в настоящее время используются операционные усилители (ОУ). Такой усилитель схематически изображен на рис. 26, его название возникло еще во времена аналоговых вычислительных машин. В настоящее время микросхемы операционных усилителей – одни из самых распространенных аналоговых микросхем. Существует много типов таких микросхем (хотя аналоговые вычислительные машины практически уже не используются). Справа на рис. 26 показана схема рис. 13 с применением операционного усилителя, в нем происходит усиление разницы между U_1 и $U_2 \cdot K_{oc}$.

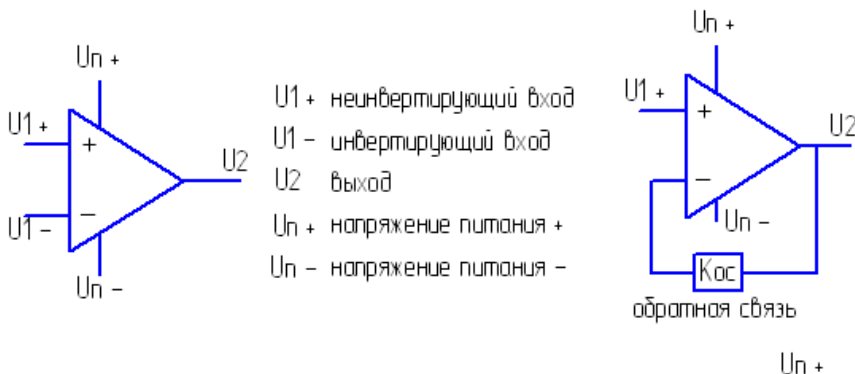


Рис. 26. Схема операционного усилителя

На рис. 27 показана схема стабилизатора напряжения на $U_{\text{вых}} = 5 \text{ В}$ с применением операционного усилителя К140УД1. Напряжение 220 В из электросети переменного тока понижается трансформатором примерно до 12 В и выпрямляется диодным мостом КЦ405В. На неинвертирующий вход ОУ 10 подается заданное значение, называемое опорным, которое получается с помощью делителя напряжения на стабилитроне КС147А и резисторе 150 Ом. Стабилитрон представляет собой нелинейное сопротивление, которое обеспечивает постоянное падение напряжения при различных значениях тока, проходящего через него.

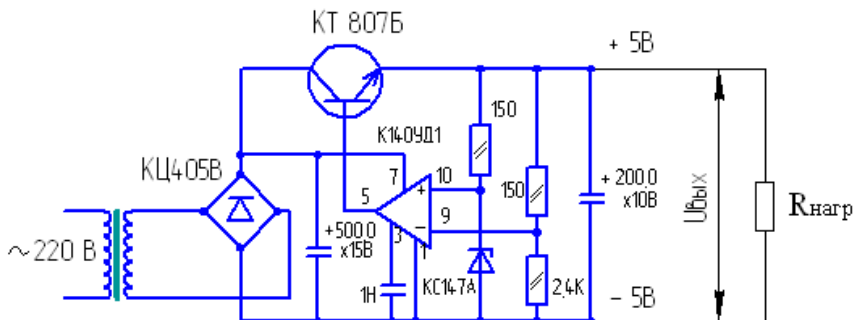


Рис. 27. Стабилизатор напряжения на операционном усилителе К140УД1

Текущее значение выходного напряжения подается на инвертирующий вход ОУ 9 через делитель на резисторах 150 Ом и 2,4 кОм.

Усиленная разница входных напряжений усилителя с его выхода 5 поступает на базу мощного регулирующего транзистора КТ 807Б, он аналогичен переменному резистору R2 на рис. 6 (может рассматриваться как исполнительный элемент). Его функцией можно считать срезание лишнего напряжения, поступающего на коллектор, до значения 5 В. На КТ 807Б теряется энергия, соизмеримая с полезной энергией на нагрузке $R_{нагр}$. По этой причине КПД данного стабилизатора напряжения примерно 50 %, а транзистор КТ 807Б сильно греется, его нужно специально охлаждать, например, с помощью радиатора. Рассмотренный стабилизатор применяется при небольших мощностях нагрузки (до 10 Вт). Все элементы схемы на рис. 27, кроме конденсаторов и трансформатора, могут быть выполнены в виде одной микросхемы, например К142ЕН5А. Дальнейшим существенным шагом в совершенствовании стабилизированного электропитания стало применение электрического ключа в качестве исполнительного элемента, что породило импульсное электропитание как в блоке питания ПК, который будет рассмотрен в дальнейшем.

5.2. Пример линейной системы управления с отрицательной обратной связью

Рассмотрим пример такой системы из области теплотехники, скажем, небольшой лабораторный электронагреватель. Его можно получить из стабилизатора напряжения (рис. 27), если увеличить максимальное выходное напряжение до 30 В, а в цепь обратной связи включить преобразователь температуры в электрическое напряжение, который обычно называется «датчиком температуры». Коэффициент передачи такого датчика в данном примере $K_{oc} = 0,05 \text{ В/}^\circ\text{C}$. Структурная схема системы на рис. 28 будет иметь классический вид (см. рис. 13). Напряжение с выхода датчика подадим на инвертирующий вход 9 операционного усилителя, а на прямой вход 10 подадим напряжение U_1 , изображающее заданную температуру, например 50°C . Заданное значение управляемого параметра называют «уставка». Тогда

$$U_1 = K_{oc} \cdot 50 = 0,05 \cdot 50 = 2,5 \text{ В.}$$

Коэффициент усиления примем $K = 20$. Непосредственное нагревание камеры нагревателя создает резистор нагрузки $R_H = 10 \text{ Ом}$, по которому протекает ток I_H . Этот резистор можно считать исполнительным элементом.

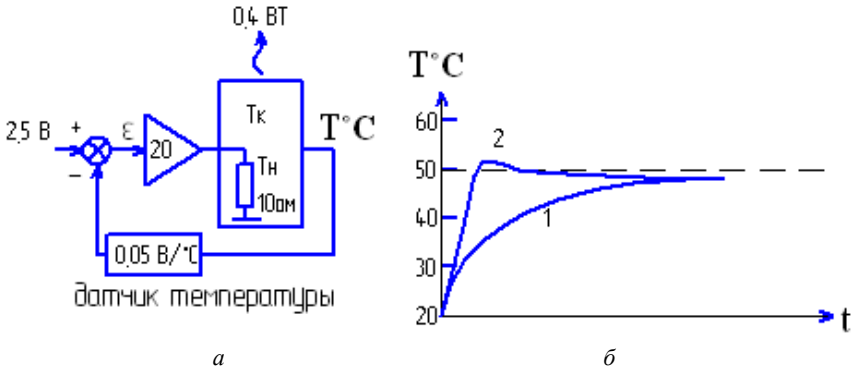


Рис. 28. Нагреватель с САУ

Первоначальную температуру нагревателя в выключенном состоянии примем 20°C . При включении нагревателя значение рассогласования

$$\varepsilon = U_1 - U_{oc} = 2,5 - 20 \cdot 0,05 = 1,5 \text{ В.}$$

Напряжение на резисторе нагревателя

$$U_H = \varepsilon \cdot K = 1,5 \cdot 20 = 30 \text{ В,}$$

ток через него

$$I_H = 30 / 10 = 3 \text{ А.}$$

Выделяемая мощность

$$P = 30 \cdot 3 = 90 \text{ Вт,}$$

которая идет на нагревание камеры нагревателя. Ее температура начинает расти, соответственно растёт напряжение на выходе

датчика температуры, рассогласование начинает падать, напряжение U_n на резисторе R_n тоже начинает падать. В квадрат раз падает мощность на R_n : $P_n = U_n^2 / R_n$, скорость нагревания замедляется. Этот процесс показан на рис. 28, б (кривая 1).

При заданной температуре $50\text{ }^\circ\text{C}$ потери энергии в нагревателе вследствие ухода в окружающую среду составляют $P_n = 0,4\text{ Вт}$. Для получения такой мощности на $R_n = 10\text{ Ом}$ требуется напряжение

$$U = \sqrt{P_n \cdot R_n} = \sqrt{0,4 \cdot 10} = 2\text{ В}.$$

Этому соответствует рассогласование

$$\varepsilon = 2 / K = 2 / 20 = 0,1\text{ В},$$

тогда напряжение обратной связи

$$U_{oc} = U_1 - \varepsilon = 2,5 - 0,1 = 2,4\text{ В}.$$

Этому соответствует температура нагревателя

$$2,4 / K_{oc} = 2,4 / 0,05 = 48\text{ }^\circ\text{C}.$$

Таким образом, рост температуры остановится на $48\text{ }^\circ\text{C}$, произойдет недогрев, неточность системы составит $2\text{ }^\circ\text{C}$ (4 %).

Нетрудно увидеть, что повышение коэффициента усиления в два раза с $K = 20$ до $K = 40$ повысит точность системы в два раза, получим неточность $1\text{ }^\circ\text{C}$ (2 %). Эту постоянную неточность можно снизить еще, если интегрировать рассогласование в установившемся режиме и затем использовать этот интеграл. Аналогично следует поступать при ручном управлении, добавляя к заданной температуре $1\text{ }^\circ\text{C}$, то есть устанавливая заданную температуру не 50 , а $51\text{ }^\circ\text{C}$.

Иногда возникает необходимость ускорить процесс нагревания. Например, если бы нагреватель продолжал, как сначала, выделять 90 Вт , то процесс описывался бы кривой 2 и шел значительно быстрее. Остановить процесс нагревания можно следующим путем. Если выключить нагреватель в момент достижения заданной температуры, то некоторое время он будет продолжать нагревание камеры, так как температура внутри него T_n гораздо больше, чем в камере T_k . В

противном случае теплоэнергия не переходила бы от него в камеру. Однако в этом случае происходит перегрев камеры. Это может оказаться недопустимым с точки зрения проводимого химического процесса в камере. Кривая I соответствует варианту очень осторожного нагревания, которое вызывается именно отрицательной обратной связью и постоянством коэффициента K (пропорциональность).

Для повышения скорости работы нагревателя и точности работы системы управления учитывают величину скорости изменения рассогласования, то есть дифференцируют рассогласование по времени. Здесь необходимо учитывать влияние такого фактора, как инерционность объекта управления, обусловленную тем, что:

- 1) теплоемкость камеры с ее содержимым и ограниченная мощность нагревателя затягивают процесс нагревания;
- 2) после отключения нагревателя он продолжает греть еще некоторое время.

При управлении движениями объектов (промышленных роботов, станков с ЧПУ) также приходится учитывать их инерционность (это рассматривается в дальнейшем).

В рассматриваемых линейных системах управления широкое распространение получила так называемая схема ПИД (пропорциональная, интегральная, дифференциальная). Основное представление о ней мы получили из примера электронагревателя (см. рис. 28). Можно сказать, что система автоматического управления ПИД была реализована схемно путем соединения основных элементов в замкнутую систему с отрицательной обратной связью в соответствии с рис. 13. Для учета интеграла и производной от рассогласования применяют специальные схемные решения, например, целые замкнутые контуры со своими датчиками и корректирующие элементы схем.

Система управления с обратной связью подвержена самовозбуждению, аналогично усилителям, рассмотренным ранее. Связанные с этим вопросы относятся к устойчивости систем управления. Условия и причины самовозбуждения были рассмотрены ранее (см. рис. 15 и 16). Существует несколько методов анализа устойчивости, предусматривающих построение и анализ двух зависимостей для разомкнутой системы в заданном диапазоне частот:

- 1) зависимости коэффициента передачи от частоты сигнала. Эта зависимость называется амплитудно-частотной характеристикой (АЧХ), например см. рис. 21;

2) зависимости угла сдвига фазы сигнала от частоты сигнала. Эта зависимость называется фазочастотной характеристикой (ФЧХ).

Данные зависимости анализируются на предмет возможности самовозбуждения согласно ранее рассмотренным условиям. Следует отметить, что система управления исследуется, в том числе и экспериментально, в разомкнутом состоянии, так как экспериментальные исследования системы при замкнутой обратной связи в случае самовозбуждения могут привести к ее повреждению.

Хорошее наглядное представление сразу об АЧХ и ФЧХ дает один график по методу Найквиста (Nyquist) [1], где в полярных координатах коэффициент передачи задается длиной радиуса-вектора, а угол сдвига по фазе задается углом радиуса-вектора для каждой частоты в заданном диапазоне частот (рис. 29).

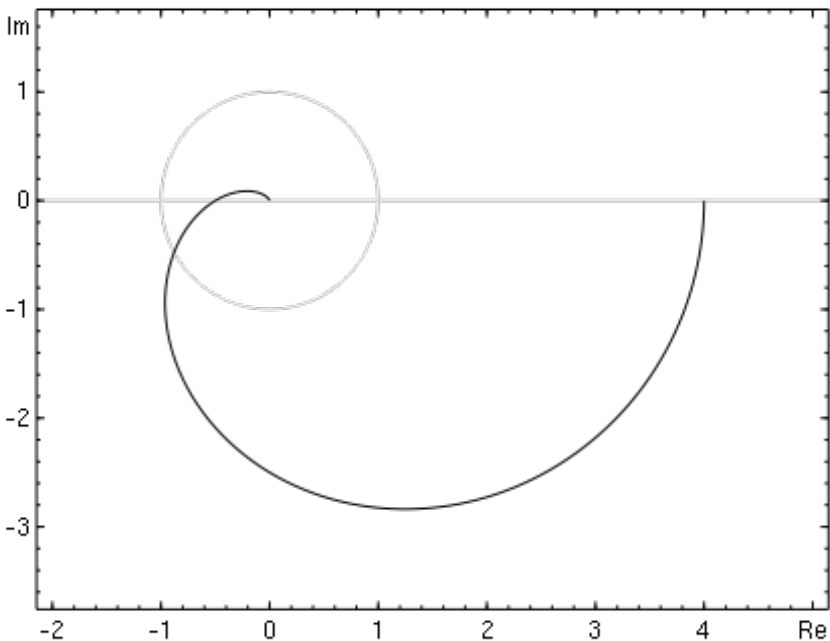


Рис. 29. Зависимость коэффициента передачи и угла сдвига по фазе от частоты в полярных координатах для системы управления в разомкнутом состоянии

Максимальная частота соответствует центру графика. Диапазон частот для САУ может начинаться значительно ниже по сравнению УЗЧ, от долей герца. На графике (см. рис. 29) минимальная частота диапазона соответствует крайней правой точке, в ней коэффициент передачи равен 4, а угол сдвига по фазе равен 0. Поскольку сигнал обратной связи вычитается, то есть подается со сдвигом по фазе 180° , то при минимальной частоте действует нормальная отрицательная обратная связь. А положительная обратная связь возникает при пересечении кривой оси абсцисс слева от центра. Но при этой частоте в приведенном примере не возникнет самовозбуждения, так как коэффициент передачи меньше 1 – пересечение внутри круга с радиусом 1. В целом график показывает, что САУ устойчива.

Повышение коэффициента усиления K с целью повышения точности системы имеет отрицательную сторону: оно увеличивает вероятность самовозбуждения системы (снижает устойчивость).

5.3. Терморегулирование

Задачи терморегулирования очень распространены: наши жилища, электростанции, котельные, литейное и химическое производство, металлургия и т. д. На рис. 30 показаны внешний вид и схема применения одного из типичных терморегуляторов ТРМ251 [9], а на рис. 31 приведены его технические характеристики. ТРМ251 рассчитан на работу в компьютерной сети и содержит в себе микропроцессор.

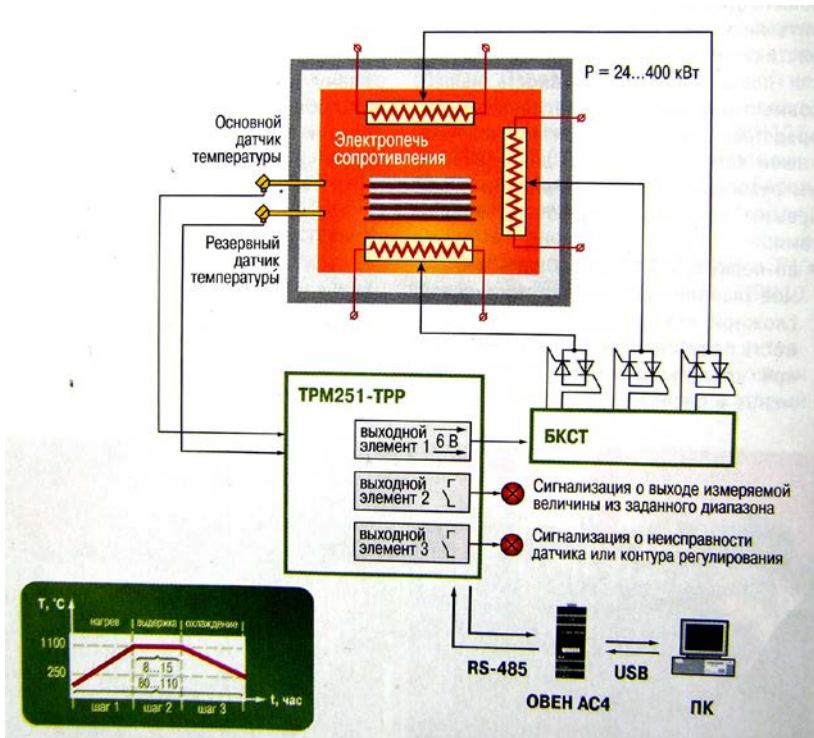


Рис. 30. Терморегулятор ТРМ251

Напряжение питания	90...245 В (47...63 Гц)
Потребляемая мощность	не более 6 ВА
Количество универсальных входов	2 (основной и резервный)
Минимальное время опроса датчика	0,3 с
Типы входных датчиков и сигналов	<ul style="list-style-type: none"> • термосопротивления ТСМ, ТСР 50/100/500/1000 Ом, ТСН 500/1000 Ом; • термопары ТХК(Л), ТЖК(Л), ТНН(Н), ТХА(К), ТПП(С), ТПП(Р), ТПР(В), ТВР(А-1,2,3), ТМК(Т); • ток 0...5 мА, 0(4)...20 мА • напряжение -50...+50 мВ, 0...1 В
Диапазон измеряемых температур	-200...+1800 °С (в зависимости от типа датчика)
Предел основной приведённой погрешности	±0,25 (для термопар ±0,5 %)
Количество выходных элементов	3
Типы выходных элементов	<ul style="list-style-type: none"> • Р – реле электромагнитное 2 А (для В32, В33 до 4 А) при 220 В 50 Гц; • К – оптопара транзисторная п-р-п типа 400 мА при 60 В постоянного тока; • С – оптопара симисторная 50 мА при 300 В (в импульсном режиме при $t_{имп} < 5$мс и частоте 100 Гц – до 1 А); • И – ЦАП «параметр – ток 4...20 мА», питание 15...32 В, нагрузка 0...900 Ом; • Т – выход для управления внешним твердотельным реле 4...6 В 50 мА
Тип интерфейса	RS-485
Скорость передачи данных	2,4...115,2 кбит/с
Протоколы передачи данных	ОВЕН, Modbus RTU, Modbus ASCII
Габаритные размеры и степень защиты корпуса:	
– настенный Н	130×105×65 мм, IP44
– щитовой Щ1	96×96×70 мм, IP54

Рис. 31. Технические характеристики терморегулятора TPM251

6. ОХЛАЖДЕНИЕ ЭВМ

Рассмотренные задачи терморегулирования относились к нагреванию объектов. Однако к терморегулированию относятся не менее распространенные задачи охлаждения многочисленных машин, в том числе и ЭВМ. Задачи охлаждения машин решались задолго до создания ЭВМ, например, охлаждение моторов, охлаждение электрических машин: генераторов, трансформаторов, двигателей, охлаждение электронных устройств и т. д. Здесь снова ставится задача обеспечить текущую температуру $T(t)$ машины

$$T_{\min} \leq T(t) \leq T_{\max},$$

либо ограничение только сверху:

$$T(t) \leq T_{\max}.$$

Причина такого требования состоит в том, что машина наиболее эффективно работает при заданной температуре либо может выйти из строя при более высокой температуре.

Как правило, машина нуждается в охлаждении только во включенном состоянии. После включения в рабочее состояние в ней начинает выделяться тепловая энергия, которая переходит в окружающую среду. Температура машины $T(t)$ растет до тех пор, пока количество тепла, выделяемого в ней, $W_{\text{вх}}$ не сравняется с количеством тепла, уходящего вовне:

$$W_{\text{вых}} = W_{\text{вх}} \text{ (тепловое равновесие).}$$

На рис. 32 слева показан случай, когда тепловое равновесие достигается при температуре, меньшей максимально допустимого значения T_{\max} . Такая картина существовала в более ранних моделях центральных процессоров, когда было достаточно естественного охлаждения окружающим воздухом без вентиляторов. Однако количество тепла на единицу площади охлаждающей поверхности по мере роста производительности ЭВМ быстро увеличивалось.

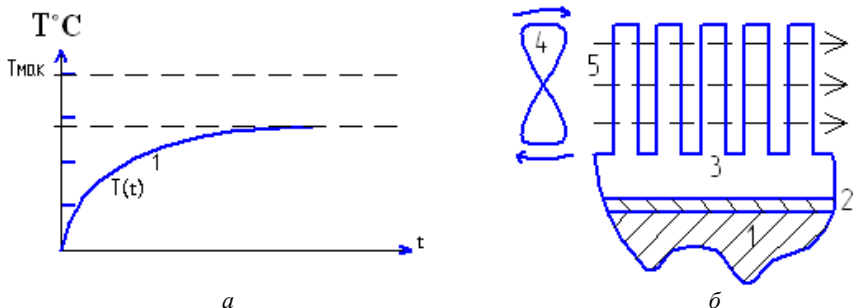


Рис. 32. Воздушное охлаждение электронных элементов

В настоящее время для охлаждения микросхемы процессора *1* обычно используется кулер (cooler), состоящий из радиатора *3* (heat sink) и вентилятора *4* (fan) на рис. 32. Движущийся воздух *5* повышает интенсивность теплообмена, а у радиатора поверхность специально увеличена, например с помощью выступающих иголок, ребер или зубцов. Для улучшения теплового контакта между микросхемой *1* и радиатором *3* используется специальная теплопроводная паста *2* (обычно белого цвета, но более плотная, чем зубная паста). Если не используется специальное управление вентилятором, то температура изменяется в случае вентилятора так же, как на рис. 32, *a*. Как правило, имеется некоторый запас возможности охлаждения. Однако этот запас со временем может исчезнуть из-за ухудшения условий охлаждения, например, из-за осаждения пыли на радиаторе, которая изолирует его от окружающего воздуха, этот случай показан на рис. 33.

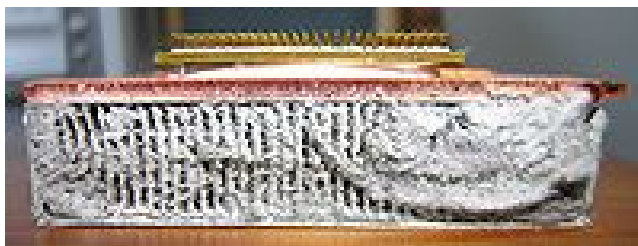


Рис. 33. Пыль на радиаторе ЦП ноутбука после трех лет работы

После этого ЦП перегревается и может временно отказать либо вовсе выйти из строя. Для предотвращения таких событий предусматривается тепловая защита микросхемы процессора: датчик температуры, встроенный в микросхему, и контроллер определяют наступление условия $T(t) > T_{\text{макс}}$ и прекращают работу микросхемы. Для надежности эта защита реализуется не программно, а аппаратно. Техническое обслуживание ЭВМ требует регулярной очистки радиаторов от пыли.

Например, на практике был случай, когда радиатор ЦП Pentium 4 неплотно к нему прилегал, но сначала этого не было известно. ПК нормально работал с программами Microsoft Office, программой Solid Works, однако зависал примерно после минуты работы в Cosmos Works при анализе прочности конструкции, полученной в Solid Works. Можно заключить, что ПК нормально работал при малой нагрузке ЦП обычно в программах диалогового режима, когда большая часть времени тратилась на чтение человеком-оператором информации с экрана и вводе информации с клавиатуры или с помощью мыши. При выполнении расчетов большого объема и непрерывной работе программы Cosmos Works ЦП максимально загружался и его температура быстро достигала $T_{\text{макс}}$, что приводило к его отключению тепловой защитой. После осмотра кулера ЦП он был плотно прижат к микросхеме ЦП с помощью зажима, ПК перестал зависать на всех программах.

Самый мощный кулер ПК имеется на блоке питания, который обычно расположен в верхнем дальнем углу корпуса ПК. Охлаждающий воздух входит в корпус спереди и вытягивается вентилятором блока питания с тыла вверху. Для улучшения доступа охлаждающего внешнего воздуха к микросхемам системной платы в корпусе устраиваются боковые окна. Отказ от плоских ленточных кабелей интерфейса АТА между дисками и системной платой в пользу круглых кабелей SATA также улучшил циркуляцию охлаждающего воздуха внутри корпуса ПК.

7. ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЕ В ЭВМ

В настоящее время существует всеобщая тенденция энергосбережения, с этой целью совершенствуется система охлаждения ЭВМ. Общая идея энергосбережения похожа на старинное правило выключать осветительные электролампы в тех местах, где не нужно освещение («уходя, гасите свет»), или уменьшать яркость еще более старинных керосиновых ламп. Одно из воплощений энергосбережения – бесшумный ПК [1], который нужен при прослушивании звуковой подсистемы с громкоговорителями, например музыки. В этом случае мешает шум ПК, который создается в основном вентиляторами, а также дисковыми накопителями. Примером мероприятий по снижению шума может служить автоматическая система управления **ASUS Q-Fan Smart Cooling System** фирмы ASUS – изготовителя материнских плат. Эта система исключает излишние затраты энергии на работу вентиляторов ПК, что важно, например, для ноутбуков, питающихся от аккумуляторных батарей. При этом повышается комфортность работы за счет снижения шума вентилятора. Этот шум пропорционален частоте вращения вентилятора. На рис. 34 показан график зависимости частоты вращения вентилятора от температуры ЦП.



Рис. 34. Зависимость частоты вращения вентилятора от температуры ЦП в системе ASUS Q-Fan Smart

После включения ПК частота вращения вентилятора составляет 3000 об/мин, это соответствует минимальному потреблению энергии вентилятором и минимальному шуму. Если температура ЦП превысит 50 °С, частота вращения вентилятора линейно повышается так, что при 60 °С частота равна 5400 об/мин, далее она остается неизменной, такой как и при отсутствии системы энергосбережения. Можно сказать, что энергосбережение вентилятора и снижение шума происходят при температуре ЦП ниже 60 °С. Аналогичные системы существуют у других изготовителей системных плат и у изготовителей ЦП, например функции **Cool'n'Quiet** для процессоров AMD K8 или **EIST** для процессоров Intel [1]. Отметим, что данные САУ помимо термодатчиков требуют наличия в качестве исполнительных элементов электродвигателей с плавным изменением частоты вращения. Из-за низких электромагнитных излучений (electromagnetic interference) в приводе вентиляторов ПК используются бесколлекторные двигатели постоянного тока (brushless DC motors).

Следующим шагом на пути совершенствования кулеров ЭВМ можно считать использование так называемых тепловых труб (heat pipe). При увеличении мощности отводимых потоков тепла и неизменных размерах радиатора теплопроводность алюминия и даже меди оказывается недостаточной. Тогда в качестве теплоносителя применяют жидкости с большой теплоемкостью. Можно использовать перекачку жидкости с помощью специального насоса, однако можно обойтись без него, что и сделано в тепловой трубе. Ее можно представить как герметично закрытую трубку, частично заполненную жидкостью, которая испаряется на горячем конце трубки, соприкасающемся с охлаждаемым телом. При этом трубка отнимает у тела тепло на испарение жидкости. Пар движется к холодному концу трубки и конденсируется на нем, отдавая теплоту парообразования. Образовавшаяся жидкость движется к горячему концу трубки по капиллярам пористого материала, которым выложена внутренняя поверхность трубки. Такие трубки диаметром до 10 мм можно найти в современных ПК.

Как было указано раньше, энергосбережение наиболее актуально в мобильных ЭВМ, питающихся от аккумуляторных батарей (ноутбук–notebook, laptop), и для больших ЭВМ, потребляющих значительные мощности (киловатты и более), например суперкомпьютер

и mainframe. Для настольных ЭВМ энергосбережение актуально с точки зрения снижения требований к охлаждению.

На рис. 23 показано, что комплементарные МОП-схемы современных процессоров основную энергию потребляют для зарядки конденсаторов, невольно и неизбежно создаваемых в этих схемах между затвором, подложкой и другими элементами. Из электротехники известно, что в заряженной емкости C накапливается энергия

$$W = Q \cdot U / 2 = C \cdot U^2 / 2,$$

где W – энергия;

Q – заряд емкости C ;

U – напряжение на емкости.

Энергия в единицу времени равна электрической мощности P , для рассматриваемого случая, когда число зарядов (переключений) этих емкостей можно принять равным тактовой частоте f [1]:

$$P_1 = C \cdot U^2 \cdot f / 2.$$

Данная составляющая энергии, потребляемой ЭВМ, составляет примерно 2/3 от всей потребляемой энергии, остальная 1/3 уходит на различные утечки через изоляцию. По мере уменьшения размеров элементов микросхем и соответственно утоньшения изоляции эти утечки возрастают. С определенным приближением примем, что потери на утечки составляют

$$P_2 = U^2 / R.$$

Из этих выражений видно, что для снижения затрат энергии конкретной ЭВМ нужно в первую очередь, если возможно, снижать значение напряжения питания U , а затем тактовой частоты f , значения C и R неизменны. Оказывается, это можно сделать в определенных пределах, учитывая работоспособность микросхем и требуемую производительность ЭВМ с точки зрения приложения. В соответствии с этим для распространенных микросхем ЦП применяются следующие энергосберегающие технологии:

- Intel SpeedStep;

- Intel VRT;
- AMD Cool'n'Quiet;
- AMD PowerNow!.

Операционная система определяет текущее значение загрузки ЦП, которая колеблется в очень широких пределах в зависимости от выполняемых программ. При снижении загрузки ЦП можно снижать энергопотребление и при этом полностью удовлетворять требования пользователя по времени ожидания реакции ПК (результатов на экране). Если снижать напряжение питания U , то при этом увеличивается время переключения элементов микросхем, что потребует соответственного снижения тактовой частоты f , иначе в ПК могут произойти сбои. Работу системы энергосбережения ПК можно представить как намеренное снижение производительности ПК тогда, когда она излишня.

С целью энергосбережения в операционных системах Windows XP и Windows 7 была разработана функция «Спящий режим» (Hibernation). При ее выполнении содержимое оперативной памяти ЭВМ записывается на магнитный диск, а компьютер выключается. При включении содержимое памяти восстанавливается и пользователь может продолжить работу с того же места, на котором он остановился. Это ускоряет работу (не проводится закрытие-инициализация драйверов и ПО, которые в сложных программных системах могут длиться довольно долго). Платой за это ускорение является значительный объем дискового пространства, близкий к объему установленной либо используемой оперативной памяти: например, при 2 гигабайтах ОЗУ ОС Windows XP заводит файл гибернации размером 2 гигабайта, а Windows 7 – 1,5 гигабайта [1].

Чрезвычайно важную роль приобретает проблема охлаждения для суперкомпьютеров, в которых содержатся сотни и тысячи отдельных ЭВМ, установленных в небольшом объеме и работающих параллельно. В них применяется очень мощная и надежная система охлаждения.

8. ИМПУЛЬСНЫЕ БЛОКИ ПИТАНИЯ

Переход на импульсные схемы позволил значительно повысить КПД, а значит, уменьшить нагревание исполнительных элементов. Кроме того, удалось существенно уменьшить размеры и массу блока питания за счет перевода трансформатора с частоты 50 Гц на десятки и сотни кГц. Внешний вид блока питания персональной ЭВМ приведен на рис. 35. Несмотря на высокий КПД, в нем есть потери энергии, поэтому его приходится охлаждать посредством радиаторов и вентилятора (как и процессоры).

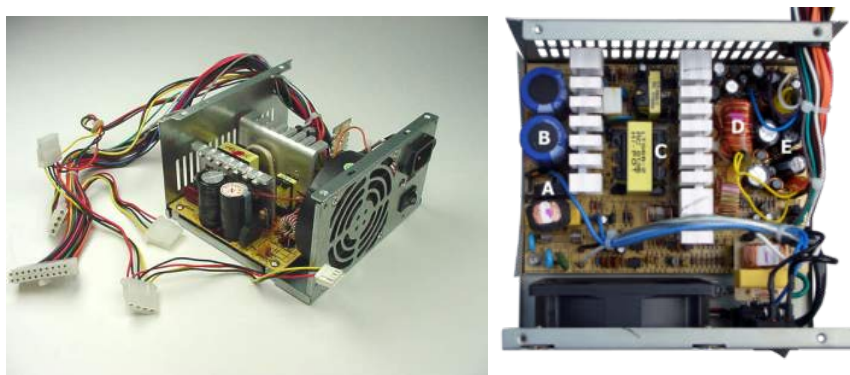


Рис. 35. Блок питания ПЭВМ: импульсный БП компьютера (ATX) со снятой крышкой:

A – входной выпрямитель. Ниже виден входной фильтр; *B* – входные сглаживающие конденсаторы. Правее виден радиатор высоковольтных транзисторов ключа; *C* – импульсный трансформатор; *D* – катушка выходного фильтра; *E* – конденсаторы выходного фильтра

Принцип работы импульсного блока питания ПЭВМ поясняет схема на рис. 36 [1]. Переменное напряжение электросети 220 В (слева на рис. 36) выпрямляется диодным мостом и заряжает конденсатор значительной емкости (поэтому он электролитический). К этому конденсатору подключена первичная обмотка понижающего трансформатора через ключ (показан схематически полевой транзистор). Этот ключ создает ток с частотой около 500 кГц, таким образом частота повышается на четыре порядка по сравнению с 50 Гц электросети, как на рис. 27. Это позволяет существенно уменьшить размеры понижающего трансформатора, однако его сердечник приходится

выполнять из феррита, который работает без потерь энергии на таких частотах, обычная электротехническая сталь здесь не годится. Со вторичной обмотки трансформатора снимается пониженное напряжение и выпрямляется диодами, сглаживается конденсаторами и подается на компьютер. Поскольку напряжение в электросети может изменяться в больших пределах, приходится стабилизировать выходное напряжение блока питания с помощью отрицательной обратной связи, которая воздействует на ключ. Можно представить, что регулирующий мощный транзистор схемы на рис. 36 работает как ключ в первичной обмотке трансформатора. Блок питания ПЭВМ выдает несколько напряжений: 12; 5; 3,3 В и т. д.

Для каждого из этих напряжений имеется своя вторичная обмотка трансформатора. Регулирование ведется по одному напряжению, например 12 В.

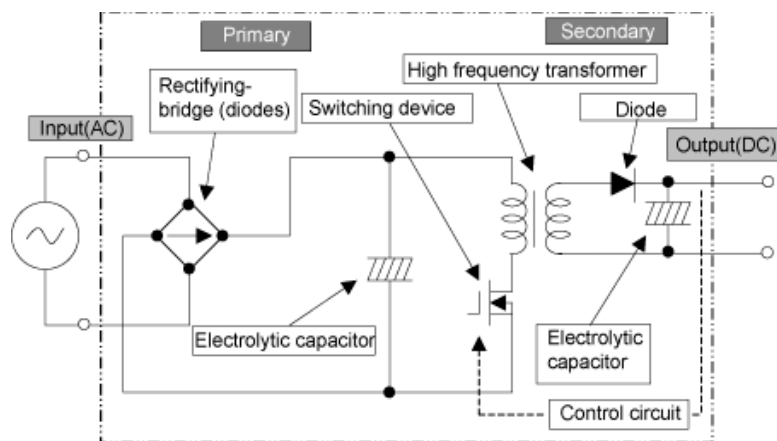


Рис. 36. Упрощенная схема блока питания ПЭВМ

Для лучшего понимания работы источника импульсного питания полезно отметить, что сначала разрабатывались способы электрозажигания двигателей внутреннего сгорания с помощью свечи, катушки бобины и контактного прерывателя. Далее были разработаны вибропреобразователи для получения анодного напряжения ламп от низковольтных источников питания накала. В телевизорах на ЭЛТ используется импульсный источник ее анодного напряжения около 10 кВ с применением трансформатора строчной развертки.

8.1. Силовые импульсные цепи

Преобразование постоянного тока в импульсы стало очень широко использоваться в силовых цепях, передающих значительные мощности, после разработки простых, дешевых и достаточно надежных мощных ключей на тиристорах, биполярных и полевых транзисторах, а также на биполярных транзисторах с изолированным затвором (insulated gate bipolar transistor – IGBT) – гибриде полевого и биполярного транзистора. Такое преобразование можно встретить в блоках питания, мощных современных усилителях звуковой частоты класса D, в устройствах электропривода с регулированием частоты вращения (последнее будет рассматриваться при изучении управления движением). Терморегулятор ТРМ251 (см. рис. 30) также управляет ключами БКСТ, которые изменяют токи в электропечи сопротивления. На рис. 37 показана схема работы ключа при изменении тока и мощности в цепи.

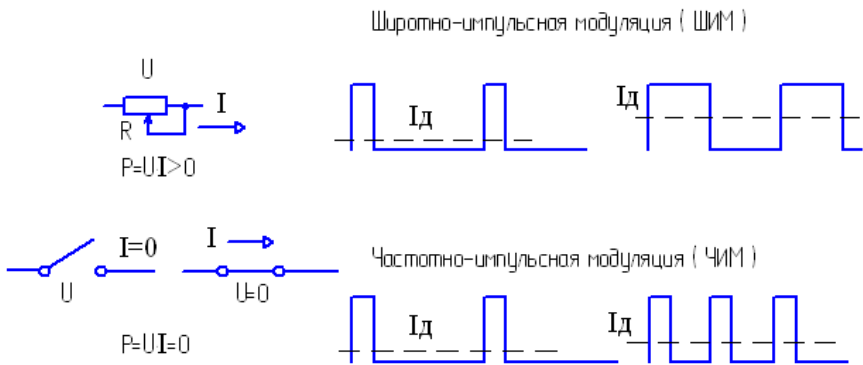


Рис. 37. Изменение тока в цепи с помощью ключа

Для сравнения вверху слева показан случай изменения тока с помощью переменного резистора (реостата), но в нем теряется мощность P . Ниже показана работа ключа при изменении тока, в данном случае действующего значения тока I_d . При этом теоретически на ключе не теряется мощность, так как в разомкнутом состоянии ток через ключ равен нулю, а в замкнутом состоянии напряжение на ключе равно нулю. Обычно используются два метода изменения параметров импульса:

1) широтно-импульсная модуляция (ШИМ), когда изменяется скважность импульсов;

2) частотно-импульсная модуляция (ЧИМ), когда изменяется частота импульсов.

На рис. 38 показан принцип работы электронного ШИМ-модулятора, в котором применяются генератор пилообразного напряжения, компаратор и R-S триггер, дающий выходные прямоугольные импульсы внизу графика.

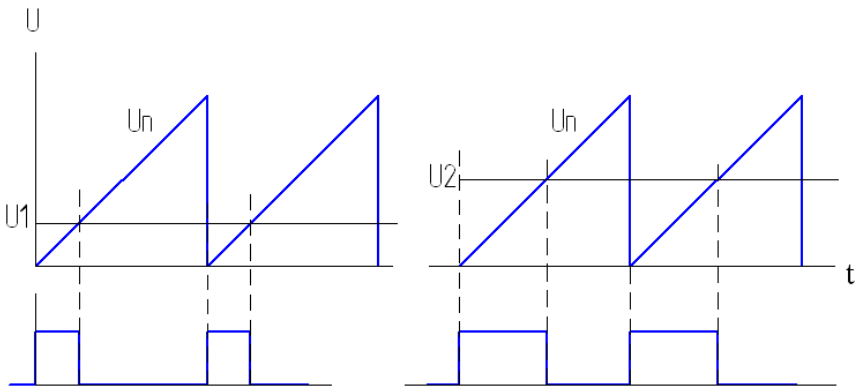


Рис. 38. Принцип работы электронного ШИМ-модулятора и аналого-цифрового преобразователя (АЦП)

Когда пилообразное напряжение $U_n = 0$, триггер устанавливается, при совпадении модулируемого напряжения U_1 или U_2 и пилообразного напряжения U_n компаратор сбрасывает триггер. Длительность импульсов на рисунке увеличивается в два раза, так как U_2 в два раза больше, чем U_1 , при этом частота импульсов неизменна.

Линейно растущее (пилообразное) напряжение можно получать двумя способами:

1) аналоговым – путем заряда конденсатора током постоянной величины от источника тока;

2) цифровым – путем накопления импульсов постоянной частоты в счетчике, на выходе которого подключен цифроаналоговый преобразователь (ЦАП). В этом случае на счетчике получается цифровое значение модулируемой (измеряемой) аналоговой величины в момент ее совпадения с пилообразным напряжением.

8.2. Цифроаналоговые и аналого-цифровые преобразователи (ЦАП, АЦП)

Поскольку очень многие сигналы – аналоговые, например сигналы на выходе микрофона, на громкоговорителе, сигналы в системах управления, то большую роль играют преобразователи ЦАП и АЦП. Очень важен их параметр – время преобразования, для АЦП оно равно длительности импульса, показанного внизу на рис. 38. Из сказанного также понятно, что ЦАП работает значительно быстрее, чем АЦП.

Схема на рис. 39 иллюстрирует принцип работы ЦАП – в нем на выходной линии $U_{\text{аналог}}$ суммируются напряжения отдельных разрядов двоичного позиционного числа в соответствии с весом каждого разряда: $2^n + 2^{n-1} + \dots + 2^1 + 2^0$. Если значение разряда равно 1, то его напряжение добавляется на выходную линию через ключ, если оно равно 0, то не добавляется. Это похоже на процедуру перевода двоичного числа в десятичное. Напряжения разрядов получаются из опорного напряжения на делителе из резисторов R , $2R$. Время работы ЦАП складывается из времени переключения ключей и времени успокоения напряжения на выходной линии.

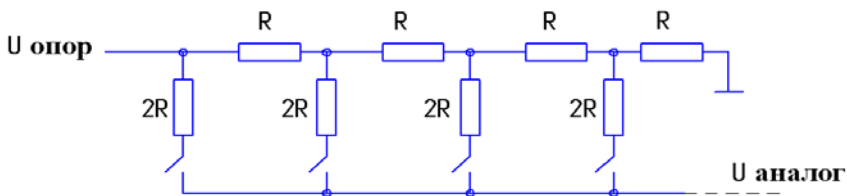


Рис. 39. Принцип работы цифроаналогового преобразователя (ЦАП)

8.3. Источники бесперебойного питания (Uninterruptable Power Supply – UPS)

Проблемы электроснабжения:

1. Исчезновение напряжения, $U_{\text{сети}} = 0$ (Power failure);
2. Повышенное напряжение (Surge);
3. Пониженное напряжение (Sag);
4. Кратковременный всплеск (Spike);
5. Высокочастотные помехи (Noise);

6. Нестабильность частоты (Frequency instability);

7. Искажение синусоиды (Harmonic distortion).

Блок питания ЭВМ справляется практически со всеми проблемами, кроме исчезновения напряжения, для чего потребуется источник бесперебойного питания (ИБП). Простейший ИБП типа Offline / Standby UPS (SPS) [1] обеспечивает резервное питание от аккумуляторной батареи и подавление кратковременных всплесков напряжения. Как показано на рис. 40, *а*, в нормальном режиме ПК подключен прямо к электросети (AC power). При этом аккумуляторная батарея заряжается через зарядное устройство (charger). При значительном изменении напряжения в электросети, в том числе и его исчезновении, питание ПК переключается на инвертор (DC-AC inverter), который дает на своем выходе переменное напряжение 220 В, близкое к синусоиде, получаемое из постоянного напряжения аккумулятора. На рис. 40, *б* показано напряжение питания ПК сначала от сети (синусоида), затем – переключение на инвертор. Время переключения ИБП на питание от батареи менее 10 мс. Форма напряжения на выходе инвертора показывает, что оно получено с помощью ключей.

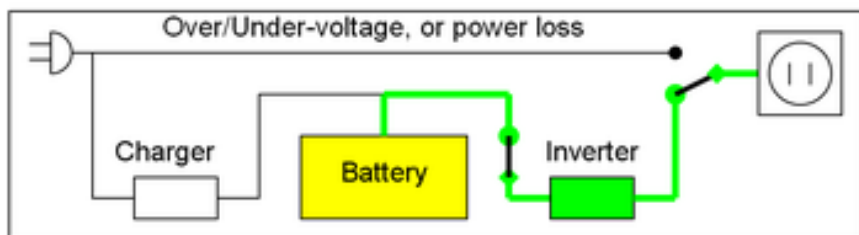
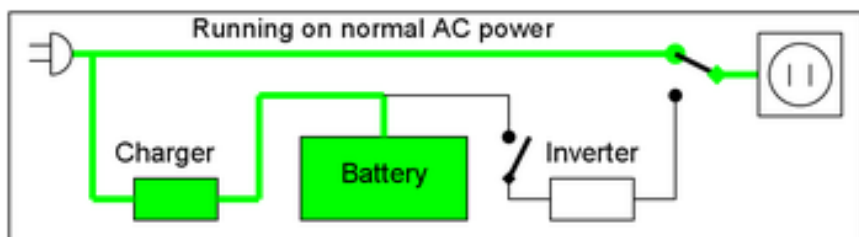
Технические характеристики ИБП AEG PROTECT Home

Входное напряжение, частота	Номинальное 230 В, 50 Гц
Выходное (при работе от батарей) напряжение, частота	230 В ± 10 % / 50 Гц ± 1 Гц
Автоматический регулятор напряжения	Нет
Выходная мощность	600 ВА / 300 Ватт
Форма выходного сигнала	ступенчатая аппроксимация синусоиды
Время автономной работы от батареи для стандартного ПК с 17" TFT монитором	10 минут
Функция запуска оборудования без подключения к электросети	Есть

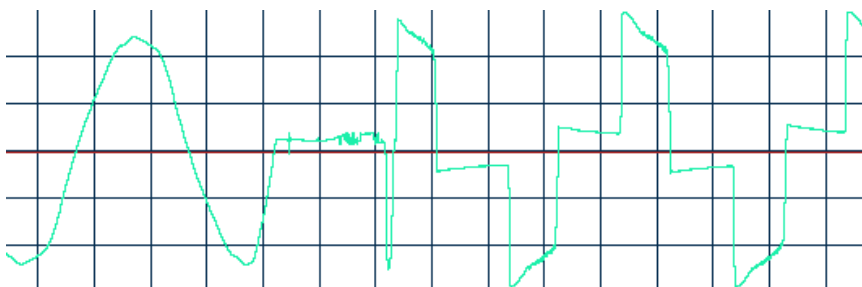
Тип, напряжение и емкость батареи	12 В, 5 А – необслуживаемая герметичная свинцово-кислотная батарея с загущенным электролитом
Время зарядки батарей до уровня 90 %	8 часов
Индикаторы	Светодиоды зеленого, желтого и красного цвета
Звуковая сигнализация	Перехода в режим работы от аккумуляторов, сигнал низкого заряда батареи, неисправность
Самодиагностика	При включении
Фильтрация импульсных помех	Есть
Защита от перегрузки	Многоразовый предохранитель на 5 А
Выходные разъемы	Четыре евrorозетки: три бесперебойного питания и одна для подключения мощного оборудования
Защита линий передачи данных	Защита телефонии: две розетки RJ-45, защищенный вход для телевизионного кабеля, соединители типа «F»
Интерфейс	USB и RS-232
Размеры Ш × Д × В	125 × 85 × 300 мм
Вес	3,5 кг
Условия работы	20–90 % (без конденсации) от 0 до +40 °С

Подавление кратковременных всплесков напряжения и высокочастотных помех производится сетевыми фильтрами с помощью емкостей и индуктивностей. Сетевые фильтры также могут выполнять максимальную токовую защиту, отключая сеть при коротких замыканиях и перегрузках по току. Сетевые фильтры значительно проще ИБП и поэтому дешевле. Их можно рассматривать как самый первый этап улучшения сетевого питания ЭВМ.

При зарядке аккумуляторов нужно преобразовывать переменный ток в постоянный с помощью выпрямителя, чаще всего построенного по схеме моста, как на рис. 27. Подобный мост используется также в блоке питания ПК, см. рис. 36.



a



б

Рис. 40. Схема источника бесперебойного питания (ИБП-UPS) и осциллограмма напряжения на выходе ИБП AEG PROTECT Home

На рис. 41, *a* приведена схема выпрямительного моста на четырех диодах, а на рис. 41, *б* поясняется его работа. Диоды работают как ключи. При питании ЭВМ от аккумулятора нужно выполнять обратное преобразование постоянного тока в переменный. Это выполняется также с помощью мостовой схемы, но в ней используются управляемые ключи на мощных транзисторах МДП или IGBT (маломощные транзисторы МДП рассмотрены ранее на рис. 23). Две схемы на рис. 41, *б* поясняют, как устройство работает, но здесь нужно представить, что вход не слева, как обычно, а справа. Парал-

лельно каждому транзистору включен предохранительный диод, защищающий транзистор от обратного перенапряжения в закрытом состоянии, здесь на мост из транзисторов наложен мост из диодов. Правая часть осциллограммы на рис. 40, б соответствует работе ключей, приведенных на рис. 41, в.

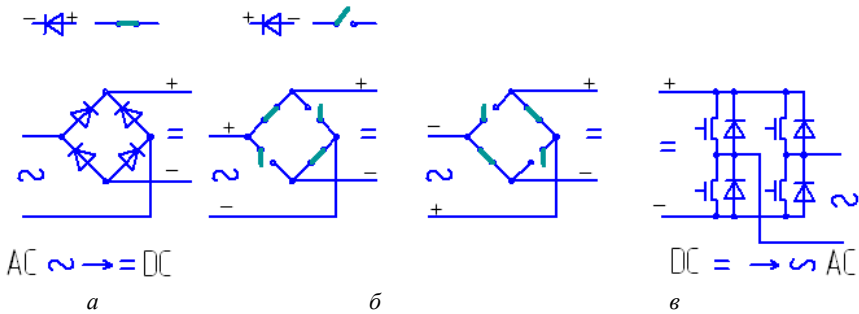


Рис. 41. Мостовые схемы преобразования переменного тока в постоянный и обратно

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. <http://www.wikipedia.org>.
2. Программное обеспечение микроЭВМ: практическое пособие: в 11 кн. / под ред. В.Ф. Шаньгина. – М.: Высшая школа, 1988. – Кн. 9: МикроЭВМ в системах управления оборудованием / П.А. Тимофеев, В.С. Дубровин, В.С. Петровский. – 127 с.: ил.
3. Основы кибернетики. Теория кибернетических систем: учебное пособие для вузов / под ред. К.А. Пупкова. – М.: Высшая школа, 1976. – 408 с.
4. Electronic amplifier. – <http://www.wikipedia.org>.
5. Элементы радиоэлектронных устройств: справочник / Б.И. Горошков. – М.: Радио и связь, 1989. – 176 с.: ил.
6. Акустика: справочник / А.П. Ефимов [и др.]. – М.: Радио и связь, 1989. – 336 с.: ил.
7. Бронштейн, И.Н. Справочник по математике для инженеров и учащихся втузов / И.Н. Бронштейн, К.А. Семендяев. – М.: ГИФМЛ, 1959. – 608 с.: ил.
8. Сравнительное тестирование активной 5.1-акустики. – <http://www.ixbt.com/multimedia/acoustic-index.shtml>.
9. www.owen.ru.
10. Василевский, А.В. Организация и функционирование ЭВМ: методическое пособие / А.В. Василевский. – Минск: БНТУ, 2009. – 64 с.: ил.

Учебное издание

БОРОДУЛЯ Алексей Валентинович
ВАСИЛЕВСКИЙ Александр Витальевич
КОЧУРОВ Вадим Александрович

ТЕХНИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ
ИНТЕГРИРОВАННЫХ САПР

Методическое пособие

В 3 частях

Часть 2

Редактор Т.Н. Микулик
Компьютерная верстка Д.А. Исаева

Подписано в печать 29.09.2011.

Формат 60×84 ¹/₁₆. Бумага офсетная.

Отпечатано на ризографе. Гарнитура Таймс.

Усл. печ. л. 4,13. Уч.-изд. л. 3,23. Тираж 100. Заказ 365.

Издатель и полиграфическое исполнение:
Белорусский национальный технический университет.

ЛИ № 02330/0494349 от 16.03.2009.

Проспект Независимости, 65. 220013, Минск.