

**Библиотека  
Инженера**

**С**  
«СОЛОН»

Титов А. А.

# Устройства управления амплитудой мощных сигналов

Управление амплитудой мощных гармонических сигналов

Управление амплитудой мощных импульсных сигналов

Проектирование устройств управления

Разработка и изготовление макетов устройств

Использование нелинейной модели для расчета

Использование однотранзисторной модели для расчета

Использование двухтранзисторной модели для расчета

ISBN 5-91359-124-1



9 785913 591241

Находка для специалиста!



УДК 621.396  
Т 45

**Титов А.А.**

Устройства управления амплитудой мощных сигналов — М.: СОЛОН-ПРЕСС, 2013. — 136 с.: ил.

Устройства управления амплитудой электрических сигналов используются во многих радиотехнических системах, например, в радиолокации, в радиосвязи, в передатчиках теле- и радиовещания. Чаще они являются частью схем автоматической регулировки усиления. Известные устройства управления не позволяют осуществлять управление мощными сигналами. Поэтому их устанавливают в маломощных цепях рассматриваемых систем, что приводит к усложнению этих систем и большой величине времени задержки сигнала управления. Указанные обстоятельства являются причиной малой надежности радиотехнических систем при их работе в нештатных ситуациях. Использование рассматриваемых в книге схемных решений построения устройств управления амплитудой мощных сигналов и методик проектирования указанных устройств позволяет значительно упростить функциональные схемы радиотехнических систем различного назначения, повысить их технические характеристики, надежность и срок эксплуатации.

Книга может быть полезна разработчикам устройств и систем различного назначения, том числе устройств генерирования гармонических и импульсных сигналов, систем сверхширокополосной радиолокации, полосовых усилителей систем связи и теле- и радиовещания, возбuditелей импульсных СВЧ-генераторов.

Книга написана по результатам исследований, проводимых по государственному контракту в рамках федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009-2013 годы.

Для разработчиков радиоаппаратуры, радиолобителей, а также студентов и аспирантов.

Ответственный за выпуск: **В. Митин**  
Обложка: **СОЛОН-ПРЕСС**

*ОО «СОЛОН-ПРЕСС»*  
123001, г. Москва, а/я 82  
Телефоны: (499) 254-44-10, (499) 252-36-96,  
(499) 795-73-26  
**E-mail: avtor@coba.ru, www.solon-press.ru**

По вопросам приобретения обращаться:

**ООО «АЛИАНС-БУКС»**  
Тел: (499) 725-54-09, 725-50-27,  
**www.alians-kniga.ru**

По вопросам подписки на журнал  
«Ремонт & Сервис» обращаться:

**ООО «СОЛОН-ПРЕСС»**  
тел.: (499) 795-73-26, e-mail: **rem\_serv@coba.ru**  
**www.remserv.ru**

**ООО «СОЛОН-ПРЕСС»**  
103050, г. Москва, Дегтярный пер., д. 5, стр. 2  
Формат 60×88/16. Объем 8,5 п. л. Тираж 200 экз.

**Заказ №**

ISBN 978-5-91359-124-1

© Титов А. А., 2013  
© Обложка, СОЛОН-ПРЕСС, 2013

## Оглавление

<b>Предисловие .....</b>	<b>6</b>
<b>Основные сокращения и условные обозначения .....</b>	<b>7</b>
<b>Глава 1 Известные устройства управления амплитудой гармонических и импульсных сигналов .....</b>	<b>9</b>
1.1. Устройства ограничения.....	9
1.2. Устройства регулирования.....	12
1.3. Устройства модуляции .....	13
<b>Глава 2 Эффект двухстороннего ограничения мощных сигналов биполярным транзистором с закрытыми переходами.....</b>	<b>16</b>
2.1. Эффект ограничения в схеме устройства управления с параллельным включением транзистора и нагрузки.....	17
2.2. Эффект ограничения в схеме устройства управления с последовательным включением транзистора и нагрузки .....	22
2.3. Физическое объяснение эффекта двухстороннего ограничения мощных сигналов биполярным транзистором с закрытыми переходами.....	24
<b>Глава 3. Устройства управления амплитудой мощных гармонических сигналов .....</b>	<b>27</b>
3.1. Устройство управления с параллельным включением транзистора и нагрузки и подачей напряжения управления на базу .....	27
3.2. Устройство управления с последовательным включением транзистора и нагрузки и подачей напряжения управления на базу .....	30
3.3. Модулятор амплитуды с последовательно-параллельным включением транзисторов в тракт передачи .....	31
3.4. Модулятор амплитуды с согласованным входом .....	34
3.5. Устройство управления с параллельным включением транзистора и нагрузки и подачей напряжения управления на коллектор.....	36
3.6. Устройство управления с последовательным включением транзистора и нагрузки и подачей напряжения управления на эмиттер .....	43
<b>Глава 4. Устройства управления амплитудой мощных импульсных сигналов .....</b>	<b>46</b>
4.1. Устройство управления с параллельным включением ограничивающего транзистора и нагрузки.....	46
4.2. Устройство управления с параллельным включением ограничивающего транзистора и нагрузки и повышенным выходным напряжением .....	49
4.3. Устройство управления с последовательным включением ограничивающего транзистора и нагрузки.....	51
4.4. Устройство управления со стабилизацией уровня насыщения ограничивающего транзистора .....	54

<b>Глава 5 Нелинейная модель биполярного транзистора с закрытыми переходами .....</b>	<b>58</b>
5.1. Анализ возможности использования нелинейной модели Гуммеля–Пуна для расчета устройств управления, использующих эффект двухстороннего ограничения.....	58
5.2. Двухтранзисторная нелинейная модель биполярного транзистора .....	59
5.3. Анализ устройства управления с параллельным включением транзистора и нагрузки и подачей напряжения управления на базу .....	62
5.4. Анализ устройства управления с последовательным включением транзистора и нагрузки и подачей напряжения управления на базу .....	64
5.5. Анализ устройства управления с параллельным включением транзистора и нагрузки и подачей напряжения управления на коллектор.....	66
5.6. Анализ устройства управления с параллельным включением транзистора и нагрузки и заземленным эмиттером .....	68
5.7. Анализ устройства управления с последовательным включением транзистора и нагрузки и подачей напряжения управления на эмиттер.....	69
5.8. Анализ устройства управления с параллельным включением транзистора и нагрузки и заземленным коллектором .....	71
<b>Глава 6 Использование однотранзисторной и двухтранзисторной моделей для расчета устройств управления амплитудой мощных импульсных сигналов .....</b>	<b>73</b>
6.1. Анализ устройств управления амплитудой мощных радиоимпульсов.....	73
6.2. Анализ устройств управления амплитудой мощных видеоимпульсов.....	77
<b>Глава 7 Проектирование устройств управления амплитудой мощных гармонических и импульсных сигналов .....</b>	<b>80</b>
7.1. Методика проектирования устройств управления амплитудой мощных гармонических сигналов .....	80
7.2. Методика проектирования согласованного устройства управления амплитудой мощных гармонических сигналов.....	86
7.3. Методика проектирования устройств управления амплитудой мощных импульсных сигналов.....	90
<b>Глава 8 Описание экспериментальных макетов устройств управления амплитудой мощных гармонических и импульсных сигналов .....</b>	<b>98</b>
8.1. Разработка и изготовление устройства управления амплитудой мощных гармонических сигналов ОВЧ диапазона .....	98
8.2. Разработка и изготовление устройств управления амплитудой мощных гармонических сигналов УВЧ диапазона.....	103

8.3. Разработка и изготовление устройств управления амплитудой мощных гармонических сигналов СВЧ диапазона.....	110
8.4. Пример использования устройства управления при построении полосового усилителя мощности с защитой от перегрузок .....	115
8.5. Разработка и изготовление устройства ограничения амплитуды мощных импульсных сигналов.....	121
8.6. Разработка и изготовление устройства регулирования амплитуды мощных импульсных сигналов.....	124
8.7. Разработка и изготовление устройства модуляции амплитуды мощных импульсных сигналов.....	130
<b>Список использованных источников .....</b>	<b>133</b>

## Глава 1

# Известные устройства управления амплитудой гармонических и импульсных сигналов

Устройства управления (УУ) амплитудой гармонических и импульсных сигналов условно можно разделить на устройства ограничения, устройства регулирования и устройства модуляции. Указанные устройства применяются во многих радиотехнических системах, например, в радиолокации, в радиосвязи, в передатчиках теле- и радиовещания.

### 1.1. Устройства ограничения

Устройства ограничения, применяемые в радиоэлектронном и электротехническом оборудовании, содержат элементы защиты, гарантирующие безопасную и надежную работу в различных ситуациях: при возникновении перенапряжений во время переходных процессов; разрядах статического электричества; в результате воздействия ударов молнии, индуцирующей высоковольтные выбросы. Устройства ограничения подразделяются на разрядники, варисторы, полупроводниковые ограничители напряжения. Устройства ограничения или ограничители напряжения предотвращают электрический пробой и защищают компоненты радиоаппаратуры от повреждения.

**Газоразрядные защитные устройства** – это герметизированный и частично или целиком газонаполненный отрезок волноводной или коаксиальной линии передачи либо герметизированная и наполненная газом колба, устанавливаемая в линию передачи [1]. При низком уровне мощности газоразрядное защитное устройство является резонансным или полосовым фильтром. Режим запирания достигается в результате возникновения в разрядных промежутках разрядника разряда под действием входной мощности, превышающей пороговую. Возникновение разряда, теория которого развита в [2], сопровождается резким уменьшением полного сопротивления в плоскостях разрядных промежутков до значений, значительно меньших характеристического сопротивления линии. В результате большая часть подводимой мощности отражается и частично поглощается в нем.

**Варистор** – это нелинейный прибор, который имеет симметричную вольтамперную характеристику, аналогичную характеристике стабилитрона. Серия оксидно-цинковых варисторов – это нелинейные резисторы, состоящие в основном из оксида цинка с добавлением оксидов других металлов. Они обладают симметричной высоконелинейной вольтамперной характеристикой при уникально высокой импульсной устойчивости. Оксидно-цинковые варисторы являются в настоящее время практически единственным быстросрабатывающим средством защиты сложных и дорогостоящих полупроводниковых систем различного назначения. Уникальные свойства варисторов используются для создания

низкочастотных фильтров, необходимых для высокоскоростных линий передачи данных, для защиты от импульсных воздействий, для шумопоглощения (радио/электромагнитные помехи). Симметричность вольтамперных характеристик варистора является одним из его преимуществ перед ограничительными диодами [3].

Высокое быстродействие варистора производитель может реализовать, только обеспечив достаточно малую индуктивность выводов изделия. Наименьшей индуктивностью обладают безвыводные варисторы. Время срабатывания варисторов 5 – 25 нс. Являясь разрядником, варистор, в простейшем случае устанавливается параллельно защищаемой схеме, последовательно с внутренним сопротивлением источника помех (имеется в виду сопротивление линии передачи данных с учетом омического импеданса кабеля). При отсутствии перенапряжения ток, проходящий через варистор, очень мал. Принцип защиты схемы варистором состоит в резком уменьшении его внутреннего сопротивления до долей Ом при возникновении импульса напряжения, и соответствующее шунтирование защищаемого объекта. Результатом является резкое увеличение тока, протекающего через варистор. Типичная вольтамперная характеристика варистора приведена на рис. 1.1.

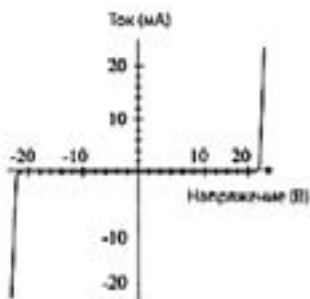


Рис. 1.1. Вольтамперная характеристика варистора

**Полупроводниковые ограничители напряжения** представляют собой отрезок линии передачи с параллельно включенными в него коммутирующими полупроводниковыми элементами [1]. По принципу действия ограничители подобны стабилитронам, поскольку основным физическим процессом, характеризующим их работу, является пороговое появление проводимости *p-n* перехода при определенном обратном напряжении. Однако ограничители имеют несколько отличные систему параметров, конструкцию и методику испытаний, обеспечивают более высокий уровень допустимого тока [4]. Ограничители рассчитаны на рассеивание энергии мощных одиночных импульсов напряжения в течение

ограниченного времени. Полупроводниковые диодные ограничители напряжения фиксируют заданный уровень напряжения на защищаемом устройстве. При превышении рабочего напряжения происходит обратимый лавинный пробой диода, он переходит в состояние с низким динамическим сопротивлением. В этом состоянии диодный ограничитель отводит импульсный ток перегрузки от защищаемого объекта и поглощает выбросы напряжения, превышающие напряжение пробоя. Время реакции на перенапряжение составляет несколько наносекунд (зависит от конструкции), импульсный ток – до сотен ампер, импульсная мощность – более 1 кВт [5, 6].

Промышленность выпускает три разновидности ограничителей – обычные (или одиночные), симметричные и малоемкостные. Первые, составляющие наиболее многочисленную группу, предназначены для защиты от аварийных импульсов цепей постоянного тока. Для защиты цепей переменного тока включают либо два обычных ограничителя встречно параллельно, либо один симметричный (неполярный), представляющий собой пару  $p-n$  переходов, включенных встречно последовательно, как и у двуханодных стабилитронов. Пример встречно параллельного включения ограничителей в схеме компаратора на операционном усилителе приведен на рис. 1.2.

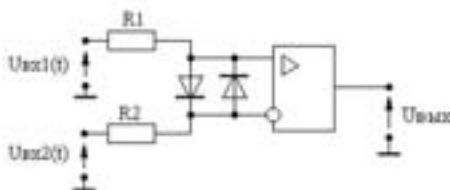


Рис. 1.2. Встречно параллельное включение ограничителей в схеме компаратора на операционном усилителе

Малоемкостные ограничители предназначены для защиты высокочастотных цепей. Структура этих приборов состоит из обычного ограничителя и включенного последовательно с ним высоковольтного диода. Когда под действием аварийного импульса открывается ограничитель, открывается и диод. В обратном направлении малоемкостной ограничитель ток не пропускает, так как диод закрыт. Иначе говоря, эти ограничители – полярные, поэтому их надо включать в защищаемую цепь попарно встречно параллельно (рис. 1.3).



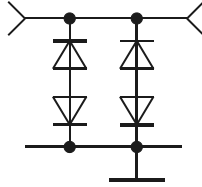


Рис. 1.3. Парно встречно параллельное включение диодных ограничителей

Введение последовательного диода позволяет сильно уменьшить общую емкость ограничителя. Для сравнения укажем, что емкость обычного ограничителя с напряжением открывания 200 В равна примерно 500 пФ, а у низковольтных может достигать 22000 пФ. Малоёмкостные ограничители напряжения способны защитить линии связи переменного тока частотой до 100 МГц. [6]. Методы расчета и проектирования различных типов диодных ограничителей приведены в [1, 4, 8].

### 1.2. Устройства регулирования

Устройства регулирования амплитуды гармонических и импульсных сигналов или аттенуаторы строятся на основе резисторов при реализации фиксированного либо ступенчатого затухания [7] и на основе использования *p-i-n* диодов и транзисторов с затвором Шоттки [9] при плавной регулировке затухания.

Аттенуаторы с фиксированным и ступенчатым затуханием с рассеиваемой мощностью от 10 Вт до 2 кВт выпускаются, например, в г. Новосибирске предприятием ООО ИТЦ КОНТУР [7]. Некоторые виды аттенуаторов приведены на рис. 1.4.

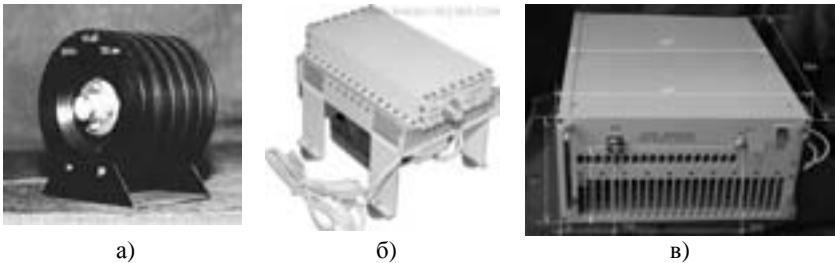


Рис. 1.4. Виды аттенуаторов: а) – 10 Вт, б) – 300 Вт, в) – 2 кВт.

Электрически управляемые диодные аттенуаторы с плавной и ступенчатой регулировкой затухания выпускаются на 8 предприятиях России: ФГУП «НПП «Исток», г. Фрязино; ЗАО «ВЧТехнологии» и ООО «Планар», г. Челябинск; НПФ «Микран» и ОАО «НИИПП», г. Томск; ОАО «Тантал» и ОАО «ЦНИИИА», г. Саратов; ФГУП «НИИПИ «Кварц», г. Н. Новгород [9].

Принцип действия электрически управляемых аттенуаторов основан на свойствах  $p-i-n$  диодов и транзисторов с затвором Шоттки изменять в широких пределах свое сопротивление при изменении протекающих через них токов. Изменение импеданса диодов и транзисторов, включенных в высокочастотный тракт, приводит к изменению вносимого ими ослабления. Использование различных схемотехнических и конструктивных решений,  $p-i-n$  диодов и транзисторов с затвором Шоттки с различным комплексом параметров, позволяет создать широкую гамму аттенуаторов в ОВЧ, УВЧ, СВЧ-диапазонах волн.

Пример реализации электрически управляемого аттенуатора на транзисторах с затвором Шоттки приведен на рис. 1.5 [10].

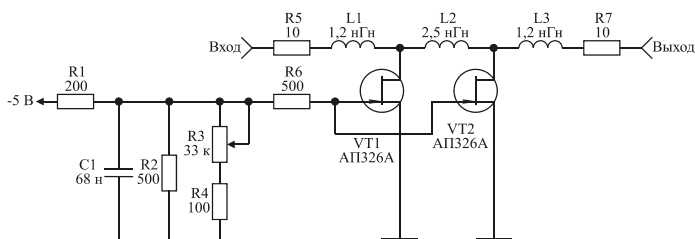


Рис. 1.5. Аттенуатор на транзисторах с затвором Шоттки

### 1.3. Устройства модуляции

В настоящее время амплитудная модуляция гармонических сигналов применяется в звуковом радиовещании на длинных, средних и коротких волнах, в телевизионном вещании, в системах ближней радиосвязи, модуляция амплитуды импульсных сигналов и формирователи радиоимпульсов используются в радиолокации, системах цифровой связи [11]. Наибольшее применение при проектировании модуляторов амплитуды гармонических колебаний находят ламповые схемы сеточной и анодной модуляции, и транзисторные схемы с базовой и коллекторной модуляцией [11].

Модуляторы амплитуды импульсных сигналов строятся с использованием того же принципа коллекторной модуляции, что и при построении модуляторов амплитуды гармонических колебаний. Примером может служить устройство управления и модуляции импульсных сигналов, описанное в [12].

Меньшее распространение получили модуляторы на диодах, имеющие коэффициент передачи менее единицы. Примером может служить модуль преобразования частоты и модуляции высокочастотных колебаний (рис. 1.6), описанный в [13] с рабочим диапазоном частот 0,05...1,5 ГГц и коэффициентом передачи минус 12 дБ.



Формирователь радиоимпульсов содержит четыре каскада усиления на транзисторах  $VT_2$ ,  $VT_3$ ,  $VT_5$ ,  $VT_6$ , выходной трансформатор сопротивлений на элементах  $L_{12}$ ,  $C_{25}$ ,  $C_{26}$ ,  $L_{13}$ , стабилизаторы напряжения на микросхеме  $DA1$  и транзисторе  $VT_1$ , схему управления питанием на транзисторе  $VT_4$  и драйвере  $DD1$ , схему управления смещением на драйвере  $DD2$ .

Формирование радиоимпульсов мощностью 1,5 Вт с несущей частотой в полосе 400...700 МГц и с использованием схемы управления питанием на транзисторе  $VT_4$  и драйвере  $DD1$  осуществляется при подаче импульсов управления на вход 2. Время установления фронта радиоимпульсов равно 45 нс, при собственном времени установления фронта импульсов, генерируемых схемой управления питанием при работе на активную нагрузку, составляющем 15 нс. При использовании схемы управления смещением импульс управления подается на вход 3. Время установления фронта радиоимпульсов, в этом случае, равно 20 нс.

Таким образом, существующие устройства управления амплитудой электрических сигналов, такие как устройства ограничения на варисторах или диодные ограничители [1], устройства регулирования на основе использования  $p-i-n$  диодов [9], устройства модуляции [11], либо не позволяют плавно изменять напряжение ограничения, либо рассчитаны на уровни мощности управляемых сигналов не превышающие 0,5...1 Вт.

## Глава 2

### Эффект двухстороннего ограничения мощных сигналов биполярным транзистором с закрытыми переходами

Развитие систем связи, навигации и радиолокации, систем телевидения и радиовещания невозможно без передачи радиосигналов на большие расстояния. Это приводит к возрастанию требований к таким параметрам различных радиотехнических систем и комплексов, как коэффициент полезного действия, уровень выходной мощности, надежность, массогабаритные показатели, стоимость, которые в значительной мере определяются применяемыми в этих системах усилителями мощности, генераторами и модуляторами моногармонических и импульсных сигналов, устройствами защиты и управления.

Актуальность разработок нового поколения перечисленных выше устройств с повышенными качественными показателями подтверждается большим числом публикаций, как в зарубежных, так и в отечественных изданиях.

Сложность проблемы достижения высокого коэффициента полезного действия, уровня выходной мощности, надежности, минимизации массогабаритных показателей и стоимости рассматриваемых систем обусловлена следующими условиями:

- разрабатываемые и используемые в настоящее время во многих радиотехнических системах устройства ограничения, регулирования и модуляции амплитуды электрических сигналов работают в режиме малой выходной мощности. Поэтому их использование в современных радиосистемах приводит к неоправданному усложнению, снижению надежности, ухудшению характеристик, повышению стоимости этих систем;
- повышение коэффициента полезного действия и выходной мощности передающих радиосистем связано с увеличением коэффициента использования транзисторов выходных каскадов передатчиков по мощности, что приводит к снижению надёжности радиосистем, обусловленной выгоранием транзисторов при работе на несогласованную нагрузку и при перегрузке по входу;
- для минимизации изменения уровня выходной мощности СВЧ генераторов на диодах Ганна и лавинно-пролетных диодах в процессе их работы, применяются возбудители со сложной системой стабилизации амплитуды импульсов возбуждения, что приводит к снижению надежности, возрастанию стоимости и массогабаритных показателей СВЧ генераторов.

В связи с вышесказанным представляется актуальной задача по разработке устройств ограничения, регулирования и модуляции амплитуды гармонических сигналов мощностью в десятки ватт и импульсных сигналов с мгновенной мощностью в единицы киловатт. Кроме того, выпускаемые в настоящее время в мире мощные передатчики систем радиосвязи, систем

УКВ ЧМ и ТВ вещания выходят из строя при рассогласовании по выходу в режиме максимальной выходной мощности. Это связано с применяемой структурой построения мощных передатчиков, когда блок управления, осуществляющий регулировку уровня сигнала подаваемого на вход усилителя мощности передатчика, находится в его маломощных цепях. Возможность управления мощными сигналами позволяет изменить структуру построения мощных передатчиков и осуществить их защиту при работе в режиме максимальной выходной мощности в условиях рассогласования по выходу. Разработка таких устройств позволит, в свою очередь, значительно повысить коэффициент полезного действия, уровень выходной мощности, надежность, снизить массогабаритные показатели и стоимость вновь создаваемых, а также функционирующих радиотехнических систем различного назначения.

Достижение поставленной задачи возможно благодаря использованию способности биполярных транзисторов с закрытыми переходами к осуществлению двухстороннего симметричного ограничения мощных гармонических и импульсных сигналов. Несмотря на многолетнюю практику использования биполярных транзисторов в радиоэлектронике, эффект двухстороннего ограничения мощных сигналов биполярным транзистором с закрытыми переходами до последнего времени не был известен и по этой причине оказался неисследованным.

### 2.1. Эффект ограничения в схеме устройства управления с параллельным включением транзистора и нагрузки

Задача управления амплитудой мощных гармонических сигналов впервые решена в устройстве защиты полосовых усилителей мощности от перегрузки по входу и от рассогласования по выходу [16], где было использовано свойство биполярного транзистора с закрытыми переходами к двухстороннему симметричному ограничению мощных сигналов [17, 18]. Функциональная схема устройства защиты приведена на рис. 2.1, где НО – направленный ответвитель,  $R_{\text{б}}$  – балластное сопротивление,  $U_{\text{упр}}$  – напряжение управления.

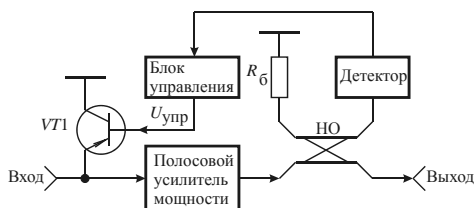


Рис. 2.1. Функциональная схема устройства защиты

Устройство защиты работает следующим образом. На базу транзистора VT1 с блока управления подается постоянное напряжение  $U_{\text{упр}}$ , запирающее