

Устройства защиты приемника: теоретические основы

Статья дает базовое представление о технологиях защиты приемника. Автор рассматривает различные виды защит, их сильные и слабые стороны, а также способы оптимального использования. Но для начала следует отметить, что процесс выбора наилучшей конфигурации защитного устройства для любого конкретного приложения обычно включает анализ множества противоречивых эксплуатационных требований. Зачастую очевидные нюансы в требованиях к эксплуатационным характеристикам могут оказать большое влияние на окончательный подход к проектированию.

Перевод: Сергей ШИХОВ
sergey@aconr.ru

Введение

Устройства защиты приемника используются в радиолокационных системах для того, чтобы уберечь приемник от нежелательных и потенциально разрушительных сигналов высокой мощности. Это могут быть как отраженные остатки сигнала собственного радиолокационного передатчика, так и сигналы, поступающие в систему из внешних источников. Так или иначе, пиковая мощность подобных сигналов обычно составляет от киловатт до мегаватт и слишком велика для любого приемника.

В некоторых конфигурациях защитное устройство может быть отдельным компонентом, расположенным в канале приема, непосредственно перед приемником. В других конфигурациях оно выполняет двойную функцию и фактически является дуплексором радара. Вот почему данная статья начнется с обсуждения распространенных методов дуплексирования.

Дуплексоры радаров

Очень многие радиолокационные системы (включая системы обнаружения ракет) используют одну антенну как для передачи, так и для приема. Поскольку для большинства радаров применяются передатчики очень высокой мощности и очень чувствительные приемники, то для радара с одной антенной требуется устройство, которое будет попеременно подключать передатчик и приемник к антенне и отключать их от нее в импульсном режиме.

Эту функцию осуществляет дуплексор — очень быстрый, самосрабатывающий SPDT-переключатель или, иными словами, переключатель приема-передачи.

Дуплексор должен выполнять следующие функции:

- Подключить передатчик к антенне (и отсоединить приемник) в течение периода отправки.
- Подключить приемник к антенне (и отсоединить передатчик) в течение периода приема.
- Всегда обеспечивать надлежащую изоляцию между приемником и передатчиком.

Существует три наиболее широко используемых типа радарных дуплексоров, каждый из которых описан ниже.

Ответвительные дуплексоры

Типичный ответвительный дуплексор показан на рис. 1. Этот тип устройств вошел в обиход во время Второй мировой войны и до сих пор применяется в недорогих радарах, например, на небольших лодках. Ответвительный дуплексор может использовать одну или

несколько ATR-трубок (разрядников блокировки передатчика) и защитное устройство приемника (RP).

В течение периода передачи ATR (Anti-Transmit-Receive-Tubes) и RP (Receiver Protector) активируются и создают очень низкие импедансы на стенках волновода, что позволяет передаваемой энергии проходить к антенне с низким затуханием.

Кроме того, RP дополнительно ограждает приемник от части передаваемого импульса, просачивающегося в канал приема.

В течение приема входной сигнал проходит через неактивную RP (хорошо согласованную с импедансом линии передачи в этом состоянии) к приемнику. ATR в это время также неактивна. Она расположена так, что канал передачи представляет собой высокое сопротивление для сигнала приема. Это сводит к минимуму потери энергии возвратного сигнала в данном направлении.

Основные преимущества ответвительного дуплексора — его простота, компактность и низкая стоимость. Главным недостатком является ограниченная рабочая полоса пропускания (примерно 5%), поскольку расстояние между элементами играет решающую роль.

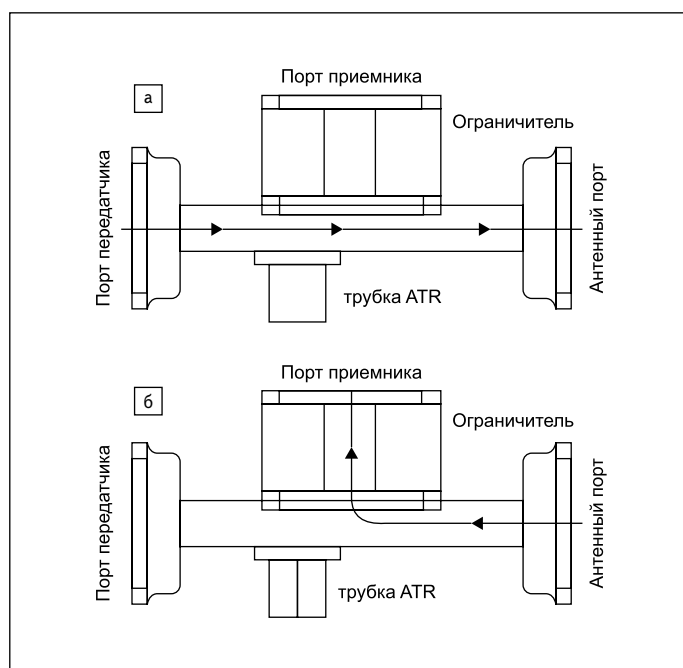


Рис. 1. Ответвительный дуплексор: а) в режиме передачи; б) в режиме приема

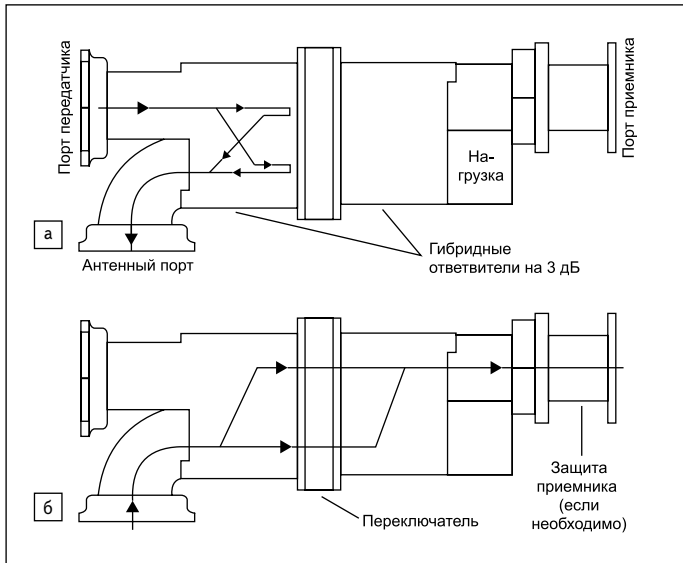


Рис. 2. Балансный дуплексор: а) в режиме передачи; б) в режиме приема

Балансные дуплексоры

Балансные дуплексоры используют возможности двух гибридных ответвителей на 3 дБ с короткими щелями в сочетании с переключающим элементом для управления направлением потока мощности (рис. 2). Двухканальный коммутационный элемент размещен между двумя гибридами. В качестве переключателя может быть использована защита приемника любого типа (трубка Pre-TR, трубка TR, TRL, и другие) в зависимости от требуемых рабочих параметров.

В течение периода передачи энергия высокой мощности будет поступать в порт передатчика и делиться пополам в каждом из двух каналов. Переключающий элемент активируется, представляя очень низкое сопротивление в двухканальной плоскости входного гибрида. Фазовые характеристики гибрида таковы, что энергия высокой мощности, отраженная в этой плоскости, будет рекомбинировать в антенном порту, что позволяет направить импульс высокой мощности от передатчика к антенне с малыми потерями. Поскольку переключающий элемент сам по себе является устройством защиты приемника, он в определенной степени защитит приемник от энергии, которая иначе устремилась бы к нему. Дополнительная защита будет обеспечена изоляционной характеристикой выходного гибрида. Если в данной конфигурации требуется дополнительно обезопасить приемник, то в канале приема непосредственно перед ним можно установить отдельный компонент защиты.

В течение периода приема входной сигнал поступает в антенный порт, расщепляется в гибриде и проходит через неактивный переключающий элемент. Затем сигнал проходит сквозь выходной гибрид и рекомбинирует в канале приема благодаря его фазовым характеристикам.

В зависимости от системных требований балансные дуплексоры могут быть выполнены в самых разных конфигурациях. Например, двойной переключатель может быть целиком основан на TR-ограничителе. В данном случае переключатель также выполнял бы функцию защиты приемника. Альтернативным подходом может быть использование в качестве переключателя только трубки pre-TR. Тогда в канале приема, вероятно, потребуются установка защиты. Также в балансном дуплексоре в качестве переключателя могут применяться трубки ATR. Выбор конфигурации зависит от системных требований.

Балансный дуплексор дает преимущества в плане ширины рабочей полосы пропускания и управления мощностью. К основным недостаткам следует отнести его размер и, возможно, относительное расположение портов. В какой-то степени этот недостаток можно обойти с помощью продуманной физической компоновки.

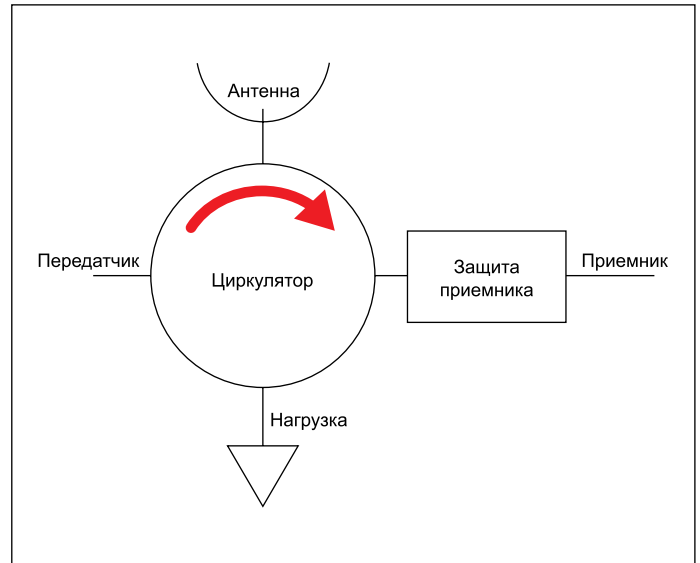


Рис. 3. Схематическое изображение дуплексора на основе циркулятора

Ферритовые циркуляторы

Ферритовый циркулятор, пожалуй, наиболее распространенный компонент, используемый для выполнения функции дуплексирования в большинстве новых системных конфигураций. Как следует из названия, способность этого компонента передавать мощность от порта к порту позволяет применять его в качестве дуплексора, как показано на рис. 3.

Строго говоря, дуплексор — это трехпортовое устройство. Значит, теоретически в качестве него можно использовать однопереходный трехпортовый циркулятор. Однако в большинстве систем это непрактично, поскольку в таком случае значительная часть мощности передатчика будет отражаться обратно. Поэтому во многих дуплексорах применяются конфигурации с четырехпортовыми циркуляторами. Это достигается либо путем объединения двух трехпортовых циркуляторов, либо с помощью циркулятора с дифференциальным фазовым сдвигом, который, по своей сути, является четырехполюсным устройством. Дифференциальные циркуляторы способны обрабатывать гораздо большую мощность, чем объединенные. Таким образом, на практике большинство дуплексоров относится к этому типу.

В любом случае, применение ферритового циркулятора в качестве дуплексора почти наверняка потребует использования защитного устройства в канале приема, поскольку обычно, в зависимости от полосы пропускания и конструкции, циркулятор обеспечивает только 10–20 дБ изоляции между передатчиком и приемником. Столь низкая степень изоляции приемлемы лишь для небольшого количества систем с очень малой мощностью. Поэтому, как правило, необходим отдельный компонент защиты приемника.

Как и балансные дуплексоры, ферритовые циркуляторы относительно широкополосны и обычно более компактны (однако не всегда). Несмотря на исключения, для большинства систем ферритовые циркуляторы, по-видимому, обеспечивают наилучший баланс между физическими размерами, стоимостью и эксплуатационными характеристиками.

Технические термины и тезисы, касающиеся защиты приемника

Прежде чем углубляться в обсуждение различных типов защитных устройств приемника и их функционирование, необходимо иметь четкое представление о некоторых технических терминах, относящихся к данному классу устройств.

В отличие от большинства микроволновых компонентов, устройства защиты приемника должны успешно функционировать в трех

совершенно разных рабочих состояниях. Первые два обычно называются состояниями низкой и высокой мощности. В состоянии низкой мощности защитное устройство фактически неактивно. Желательно, чтобы в этом состоянии компонент был хорошо согласован с линией передачи и вносимые потери для эхо-сигнала, возвращающегося в приемник, были как можно ниже.

В режиме высокой мощности устройство активируется для защиты приемника от нежелательных и потенциально опасных мощных сигналов. Третье состояние — переход из состояния высокой в состояние низкой мощности. Его обычно называют периодом восстановления.

Требования к защите во время этих трех состояний часто вступают в конфликт между собой, поэтому для достижения оптимальных рабочих характеристик устройства необходимо идти на множество компромиссов. В следующих разделах приведены термины и тезисы, которые важны для определения характеристик и конструкции защитного устройства приемника.

Состояние низкой мощности

Состояние низкой мощности иногда называют состоянием вносимых потерь. Это состояние, в котором находится защитное устройство приемника в течение периода времени, когда радиолокационная система пребывает в покое и прослушивает возвратные эхо-сигналы цели. В этот период защитное устройство должно быть как можно лучше согласовано, чтобы обеспечивать минимальные вносимые потери. Для разработчика системы вносимые потери защитного устройства приемника (в дБ) означают увеличение показателя шума. Следовательно, рассмотрение конструкции в этом разрезе должно быть сосредоточено на достижении желаемой мгновенной ширины полосы пропускания с низким КСВН и низкими потерями поглощения. В некоторых случаях, например, для моноимпульсных систем, также важна вносимая фазовая характеристика блока и/или его способность отслеживать фазу других блоков.

При проектировании защиты приемника в этом состоянии исходят из максимального ожидаемого уровня мощности принимаемого сигнала. Конструкции защитных устройств приемника разрабатываются с тем расчетом, что этот уровень не превысит пикового значения -10 дБм ($0,1$ МВт). А при превышении данного уровня мощности можно ожидать, что стандартная защита приемника начнет ограничивать, тем самым сжимая входной сигнал и/или порождая нежелательные сигналы, такие как гармоники или интермодальные продукты. Для большинства систем работы ниже -10 дБм более чем достаточно. Однако в зависимости от других аспектов требований к рабочим характеристикам часто можно спроектировать защитные устройства приемника, входящие в ограничение при более высоких уровнях мощности (например, 0 или $+10$ дБм).

Состояние высокой мощности

Состояние высокой мощности — это такое состояние устройства защиты приемника, когда оно активировано и защищает приемник от сигналов высокой мощности.

Входные данные

Первым шагом при проектировании состояния высокой мощности является достижение полного понимания природы всех высоко-мощных сигналов, которые потенциально могут попасть в канал приема. Эти сигналы поступают из нескольких источников различными способами:

- Собственный передатчик системы при нормальных условиях эксплуатации. Ожидается, что при нормальной работе системы с него на защитное устройство приемника поступит некоторое количество мощности (например, нормальная рабочая мощность). Это не полная мощность передатчика, а скорее сумма мощности передатчика, просачивающейся через дуплексор в канал приема, и мощности, отражающейся в канал приема в результате несоответствия КСВН в канале антенны (рис. 4). В большинстве систем

составляющая, отраженная от порта антенны, намного больше той, что просачивается через дуплексор. Если это не оговорено конкретно, защита приемника проектируется из расчета, что нормальная рабочая мощность на 10 дБ ниже мощности передатчика.

- Мощность перегрузки — это мощность, которая будет поступать в канал приема в случае возникновения дуги или катастрофического сбоя в другом месте системы. В целях безопасности, если не известно иное, мощность перегрузки полагается равной полной мощности передатчика.
- Внутриполосные сигналы, которые поступают в систему через антенну в результате излучения других близлежащих систем.
- Внеполосные сигналы — это могут быть, опять же, принятые излучения внешних близлежащих систем, или они могут появиться в результате возникновения переходных процессов, гармоник и других внеполосных составляющих, присутствующих в собственном сигнале передатчика системы. Все это должно быть очень тщательно изучено разработчиком системы. Бывали случаи, когда трудно обнаружимые сигналы вызвали наибольшее количество проблем и защитные устройства приемников в некоторых радиолокационных системах приходилось заменять на модернизированные конструкции уже постфактум, поскольку их внеполосные сигналы не были идентифицированы в начале проектирования и были обнаружены с опозданием, что привело к проблемам в работе системы.

Идентификация и описание всех сигналов высокой мощности должны выполняться с учетом их частот, пиковой мощности, ширины импульса и рабочего цикла. Многие современные системы функционируют с широко варьирующимися импульсными и рабочими режимами. Инженер-конструктор защитного устройства приемника должен знать о них как можно больше. Требуется знание и конкретизация максимальных уровней мощности, а также минимальной и максимальной ширины импульса и рабочих циклов.

Другой важный аспект характеристики входной мощности — время нарастания импульса. Любому устройству защиты приемника требуется конечное количество времени, чтобы перейти в состояние высокой мощности. В течение переходного периода величина просачивающейся мощности будет несколько выше, чем в оставшейся части импульса, когда устройство достигло своей максимальной степени защиты. Это явление называется «выброс». Его амплитуда и ширина будут в некоторой степени зависеть от времени нарастания импульса входного сигнала. Как правило, амплитуда выброса будет тем выше, чем короче время нарастания.

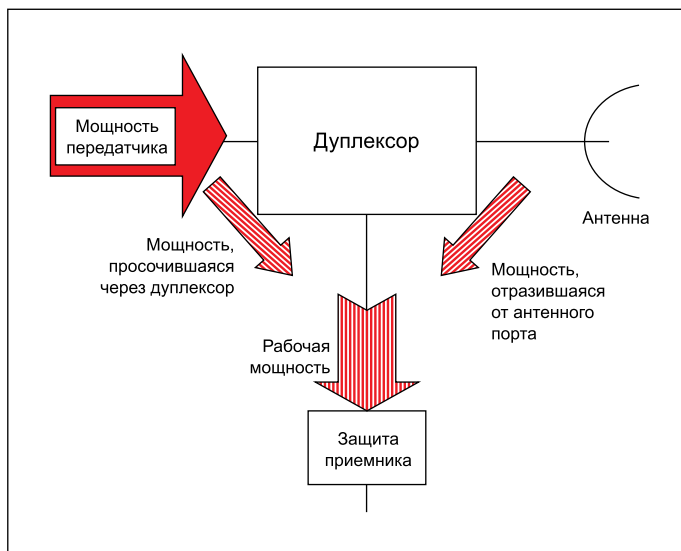


Рис. 4. Пути прохождения сигналов высокой мощности от собственного передатчика к приемнику

Выходные характеристики

Выходные характеристики защитного устройства в режиме высокой мощности — это форма и количество энергии, которая через него протекает во время выполнения своей функции. Характеристики работоспособности, которые имеют значение в данном состоянии, — это мощность пробоя, просачивающаяся мощность выброса и энергия выброса, а также просачивающаяся мощность плоской части импульса. За исключением энергии выброса, это амплитудные параметры, измеряемые на импульсе просачивающегося сигнала. Энергия выброса — расчетный параметр, вычисляемый исходя из значений амплитуды и ширины пиковой составляющей импульса просачивающегося сигнала.

Среди всех названных параметров мощность пробоя, пожалуй, понимается наиболее превратно. Лучше всего этот параметр можно описать следующим образом. В состоянии низкой мощности защита приемника неактивна, следовательно, выходной импульс по амплитуде и форме будет приблизительно равен входному. По мере увеличения амплитуды входного импульса, амплитуда выходного будет также увеличиваться. В какой-то момент, в зависимости от типа, защита приемника начнет действовать и перейдет в активный режим. Этот переход может быть очень резким (как в случае с TR-трубкой) или очень плавным (как в случае с диодным ограничителем). В любом случае, наступит момент, когда амплитуда импульса просачивающегося сигнала начнет уменьшаться при дальнейшем росте амплитуды входного сигнала. Это и есть точка пробоя. Мощность пробоя — это, по определению и отраслевому соглашению, амплитуда импульса просачивающейся мощности в точке, где дальнейшее увеличение входной мощности приводит к снижению просачивающейся мощности. Следовательно, в общем случае мощность пробоя представляет собой максимальную полную просачивающуюся мощность импульса, которая будет проходить через устройство защиты приемника для любого значения входной мощности в пределах ее номинального рабочего диапазона. При уровнях входной мощности, превышающих точку пробоя, импульс просачивающейся мощности будет иметь выброс и плоскую часть. Как сказано

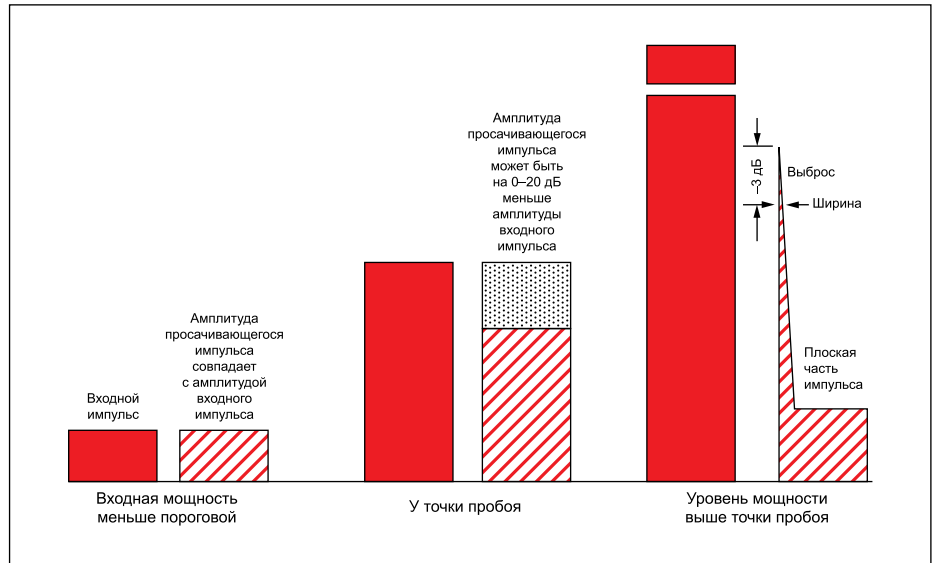


Рис. 5. Характеристики формы входных и выходных импульсов

выше, выброс — это часть импульса просачивающегося сигнала, находящаяся на переднем фронте. Он появляется потому, что для перехода защитного устройства приемника в режим жесткого ограничения необходимо некоторое время. Основная часть импульса является плоской и становится таковой после реализации максимального ограничения. На рис. 5 показаны эти взаимосвязи.

В зависимости от типа защиты приемника, времени нарастания импульса и т. д., ширина импульса обычно составляет 2–20 нс. Энергия выброса рассчитывается как площадь под кривой зависимости мощности от времени выброса. На практике принято рассматривать выброс как треугольник и измерять его ширину на 3 дБ ниже пиковой амплитуды. Затем энергия выброса вычисляется как:

$$\begin{aligned} \text{Энергия выброса} &= \\ &= (\text{Мощность выброса} - \\ &- \text{Заданная мощность плоской части} \\ &\quad \text{импульса}) \times \\ &\quad \times \text{Ширина выброса.} \end{aligned}$$

Результат может быть выражен либо в эргах, либо в наноджоулях. Раньше энергия выброса считалась важным параметром. Однако для многих современных систем тре-

бования к амплитуде выброса настолько низки, что в большинстве случаев его энергия не является проблемой с точки зрения защиты приемника. Очень часто нет смысла даже указывать этот параметр.

Очевидно, что полное и точное понимание диапазона мощности, в котором ожидается работа устройства защиты приемника, очень важно для правильного проектирования и технического описания. Если ожидается, что устройство всегда будет сохранять нормальную работоспособность значительно выше точки пробоя, тогда параметр мощности пробоя может не иметь практического значения. Однако если его рабочая точка будет находиться близко к точке пробоя или на уровне с ней, то мощность пробоя может оказаться наиболее важным параметром.

Время восстановления

Период, когда устройство находится в процессе перехода из состояния высокой мощности обратно в состояние низкой мощности, называется временем восстановления. Измерение времени восстановления начинается с момента окончания импульса передатчика. Это точка на заднем фронте импульса, в которой мощность упала ниже уровня ограничения.

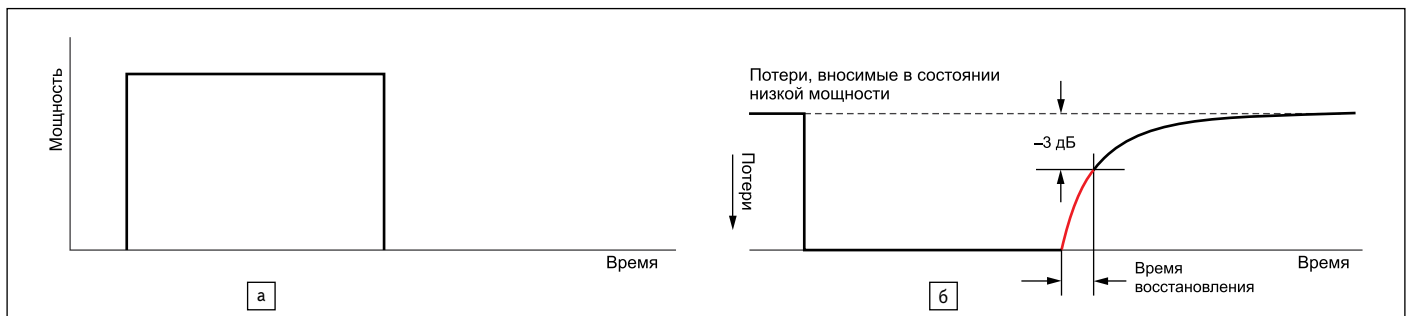


Рис. 6. Время восстановления

На практике это значит, что измерение времени восстановления начинается в момент, когда входная мощность упала до нуля (рис. 6).

Конечная точка измерения времени восстановления может варьироваться от устройства к устройству и часто зависит от требований системного приложения. Однако, в отсутствие каких-либо других требований, согласно стандартному отраслевому определению, время восстановления измеряется с момента прекращения импульса передатчика до момента, когда устройство вернулось к уровню вносимых потерь в состоянии покоя в пределах -3 дБ.

Следующие моменты, касающиеся времени восстановления, являются ключевыми:

- Время восстановления — это относительное измерение. Его конечная точка расположена относительно уровня вносимых потерь в режиме покоя. Например, если вносимые потери конкретного устройства составляют 0,5 дБ, а измерение восстановления задано для 3 дБ, то абсолютные вносимые потери в точке измерения составят 3,5 дБ.
- Хотя восстановление амплитуды, безусловно, является наиболее распространенным задаваемым параметром, при необходимости также можно указать восстановление фазы.
- Необходимость соблюдения определенного значения времени восстановления имеет основополагающее значение с точки зрения выбора наилучшего подхода к проектированию для конкретного применения.
- Проектирование с учетом очень быстрого времени восстановления может отрицательно влиять на другие параметры. Поэтому очень важно как можно более тщательно выбирать время восстановления.
- Как будет сказано далее, различные технологии защиты приемника демонстрируют совершенно разные характеристики восстановления. В целом, однако, время восстановления для любого данного устройства зависит от падающей мощности и длительности импульса. Более высокая мощность и большая ширина импульса означают более длительное время восстановления.
- Хотя устройство защиты приемника должно быть сконструировано таким образом, чтобы успешно справляться со всеми уровнями мощности вплоть до номинальной мощности перегрузки, время восстановления обычно указывается только для максимальной нормальной рабочей мощности.
- Очевидно, что контроль заднего фронта импульса передатчика имеет решающее значение для быстрого восстановления.

И последнее замечание: хотя время восстановления зависит от входной мощности, оно должно рассматриваться в защитном устройстве приемника поэлементно. Каждый компонент защитного устройства приемника

может иметь свою характеристику восстановления, а также некоторые компоненты могут быть защищены другими. Поэтому их взаимодействие в устройстве защиты приемника, если рассматривать его с точки зрения времени восстановления, является комплексным. Для конечного пользователя это означает, что в некоторых конструкциях уровень мощности, при котором наблюдается максимальное время восстановления, может не быть равным максимальной рабочей мощности. Фактически в некоторых конструкциях время восстановления будет максимальным при уровнях мощности значительно ниже этой точки. Это еще одна причина, почему полное понимание ожидаемых входных параметров рабочей мощности так важно для оптимизации характеристик защиты приемника.

Защита приемника: активная или пассивная?

Говоря простым языком, пассивная защита приемника — та, что активируется самостоятельно и не требует внешнего управления для выполнения своей функции. Активная защита — это, по сути, переключатель. Как правило, для ее реализации используются переключатели типа SPST или SPDT.

Существуют также гибридные конструкции, называемые квазиактивными, в которых используется комбинация пассивных и активных элементов.

При прочих равных условиях предпочтительно использование защиты пассивного типа для любого приложения, поскольку это обеспечивает более надежную защиту от широкого спектра потенциальных угроз, нежели применение защитного устройства активного типа. Пассивная защита является полностью автоматической и самоактивирующейся и будет защищать от внешних сигналов (любых, для которых она предназначена), даже если радар выключен.

Активная защита приемника, как правило, используется, если это позволяет добиться применения в конструкции исключительно твердотельных компонентов, достичь более быстрого восстановления, или в том случае, когда требуется существенно уменьшить просачивающуюся мощность (менее $+10$ дБм).

Однако преимущества использования защиты активного типа сопровождаются следующими рисками:

- При сбое управляющего сигнала защита приемника выйдет из строя, что является дополнительным фактором, уменьшающим его надежность.
- Активные защитные устройства могут оградить только от сигналов, синхронизированных с импульсом передатчика. Таким образом, не будет никакой защиты от несинхронных внешних сигналов. Если система выключена, защита не обеспечивается.

В некоторых случаях возможно разработать защитное устройство приемника, которое, обеспечивая базовую пассивную защиту, включает активную составляющую для повышения производительности при нормальных условиях эксплуатации. Это вполне разумная альтернатива. Тем не менее использование активных или квазиактивных средств защиты приемника, требующих внешнего управления для выполнения основной защитной функции, не рекомендуется, кроме случаев, когда нет другого способа достичь желаемых характеристик, а вероятность угроз, которые могут возникнуть из-за недостатков данного подхода, низка или равна нулю.

Базовые технологии защиты приемника

Для того чтобы понять, как осуществляется защита приемника, необходимо знать, что это, как правило, не один компонент. Обычно это сборка из двух или более компонентов, в каждом из которых использованы различные базовые технологии. На данный момент широко применяется пять основных технологий:

- трубка TR;
- трубка Pre-TR;
- ферритовый ограничитель;
- диодный ограничитель;
- мультипактор.

Каждая из них имеет свои сильные и слабые стороны. В любом проекте задача инженера состоит в том, чтобы использовать такую комбинацию технологий, которая обеспечит наилучшие общие рабочие характеристики, с учетом необходимых требований для данного применения.

Трубка TR

Трубка TR — наиболее распространенная на сегодня технология защиты приемника. Ее конструкция состоит из одной или нескольких резонансных фильтрующих секций, заключенных в отрезке волновода, герметизированного с обоих концов волноводными окнами. Каждая секция фильтра — это параллельная LC-цепь с относительно высокой добротностью. Усеченные конусы образуют емкостный элемент, а диафрагмы или столбики — индуктивный элемент (рис. 7). Из волновода откачивается воздух, после чего он снова заполняется газом или смесью газов с давлением ниже атмосферного.

В режиме малой мощности трубка TR представляет собой полосовой фильтр, характеристики которого определяются размерами и расстоянием между фильтрующими элементами и окнами. Эти размеры задаются таким образом, чтобы обеспечить минимальный КСВН и вносимые потери в интересующей полосе частот. Появление сигнала высокой мощности вызовет образование дуги в зазорах между конусами. Это

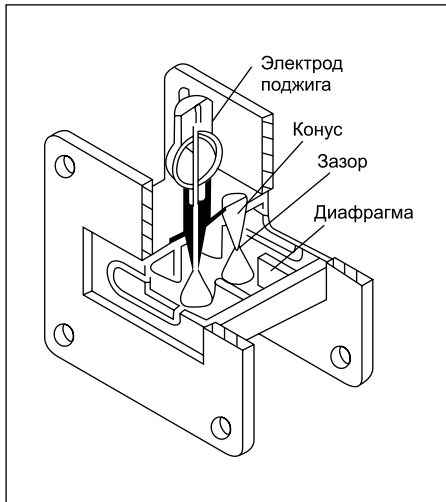


Рис. 7. Трубка TR

повлечет за собой ионизацию газа в области конусов, что приведет к отражению большей части мощности от устройства. Если мощность достаточно высока, то зажжется окно ввода, обеспечив дополнительную защиту.

Газовые разряды по своей природе нестабильны. Поэтому необходимы некие средства зарядки газа, для обеспечения стабильного срабатывания при каждом импульсе. В самых ранних конструкциях TR-трубок для этой цели использовался небольшой электрод, называемый электродом поджига (рис. 7). Он помещался в середину одного из конусов, имеющего для этого специальную полость. Подача на электрод постоянного напряжения порядка ~ 1000 В приведет к протеканию тока между электродом и поверхностью конуса, обеспечивая насыщение газа свободными электронами. Несмотря на то что такая схема работает весьма хорошо, следует учитывать, что в дополнение к неудобствам, связанным с необходимостью подключения источника питания, функционирование электрода поджига также ограничивает срок службы трубки и является источником небольшого количества избыточного шума.

Для преодоления этих проблем был разработан метод насыщения газа электронами с помощью радиоактивного излучения. Для этого используется очень маленький радиоактивный источник, заключенный в корпус разрядника и расположенный таким образом, чтобы освещать один из зазоров между конусами, обеспечивая тем самым источник электронов для стабильного поджига. Практически во всех современных трубках TR используется радиоактивное насыщение электронами. Это очень безопасная технология, которая устраняет необходимость в большом источнике питания, делает устройство полностью пассивным, а также значительно увеличивает срок его службы. Кроме того, применение данного решения свободно от такого недостатка, как избыточный шум, создаваемый электродом поджига.

Трубка TR характеризуется следующим образом:

- Обеспечивает хорошую защиту при относительно низкой стоимости. Во многих случаях, ее применение обеспечивает лучшее соотношение цены и качества.
- Помимо функционирования в рабочем диапазоне частот, трубка TR также обеспечивает хорошую защиту на частотах вне его. Это свойство является особенностью данной технологии и не требует дополнительных затрат для реализации.
- Устройство подходит для управления средней мощностью. В первую очередь мощность ограничена ростом температуры на стекле входного окна вследствие газового разряда, но она может быть значительно увеличена за счет использования керамического окна, если это необходимо.
- Трубка TR имеет относительно большое время восстановления. Время восстановления напрямую зависит от входной мощности и ширины импульса и обратно пропорционально рабочей частоте.
- Срок службы устройства ограничен, и зависит от объема газа, а также от других параметров, в том числе мощности и рабочего цикла. Для продления срока службы может быть использован газовый резервуар.
- Трубка TR обладает очень большим динамическим диапазоном рабочей мощности и хорошей устойчивостью к превышению номинальной мощности. Сущность явления, лежащего в основе данной технологии такова, что с увеличением мощности ее ослабление также усиливается. Таким образом, после активации защиты, просачивающаяся мощность плоской части СВЧ-импульса остается достаточно постоянной при увеличении уровней входной мощности.

Трубка Pre-TR

Трубка Pre-TR также является газовым плазменным ограничителем и работает по тому же принципу, что и трубка TR, описанная выше. Разница между ними в том, что в трубке Pre-TR газ заключен в кварцевую трубку (рис. 8). Это дает два преимущества:

- Кварц имеет гораздо более высокую температуру плавления, чем стекло. Таким образом, трубка Pre-TR будет рассеивать больше энергии, чем трубка TR.
- Заключение газа в кварцевый цилиндр позволяет использовать газы, имеющие более быстрое время восстановления, но не подходящие для использования в целиком заполненной трубке TR. Кроме того, данная технология обеспечивает очень низкие вносимые потери (обычно менее 0,1 дБ). Основной недостаток трубки Pre-TR состоит в том, что ее схема с низкой добротностью не обеспечивает такой защиты, как у трубки TR, как в рабочей полосе, так и вне ее. Таким образом, трубка Pre-TR служит «предварительным ограничителем» с низки-

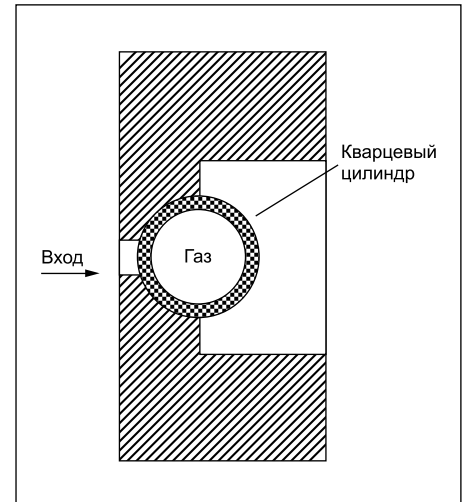


Рис. 8. Трубка Pre-TR

ми потерями на входе узла защиты приемника, что позволяет всему узлу обрабатывать практически любое количество мощности. За трубкой Pre-TR должны следовать другие устройства защиты приемника (диодный ограничитель или разрядник защиты приемника с ограничителем), которые уменьшат просачивающуюся мощность до уровней, безопасных для приемника.

Ферритовый ограничитель

Ферритовый ограничитель представляет собой полностью твердотельное устройство. В нем используется ферритовый материал, который монтируется вдоль одной или обеих стенок волновода (рис. 9). На феррит действует постоянное магнитное поле. Электроны в феррите будут прецессировать вокруг линий магнитного поля. В состоянии низкой мощности это устройство выглядит как отрезок волновода, нагруженный диэлектриком. Однако когда входная мощность достигает критического порога, радиочастотная энергия соединяется с прецессионным движением, заставляя феррит поглощать мощность во время прохождения радиочастотной энергии по волноводу. Поглощенная энергия преобразуется в тепло.

Ферритовый ограничитель — это устройство управления средней мощностью, подходящее для приложений, где средняя мощ-

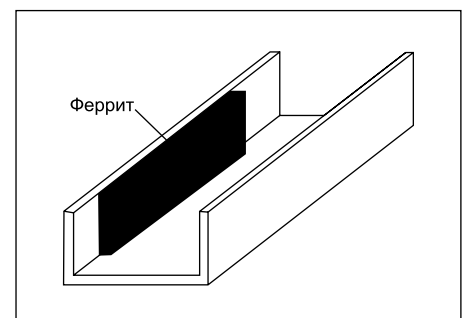


Рис. 9. Ферритовый ограничитель (в разрезе)

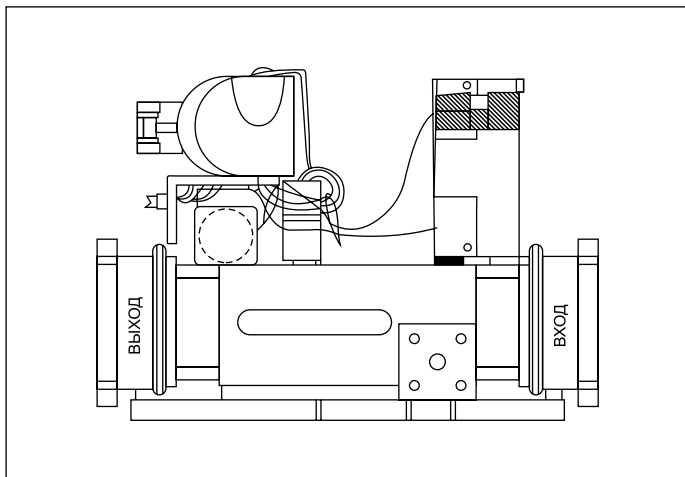


Рис. 10. Мультипактор

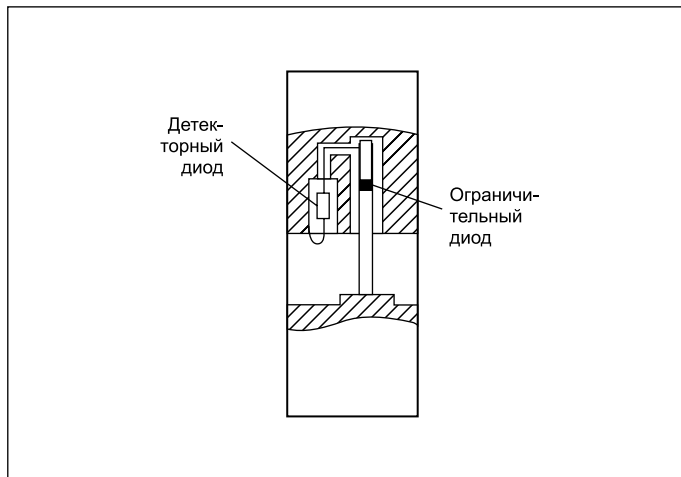


Рис. 11. Диодный ограничитель

ность относительно невелика, и имеющее следующие преимущества:

- будучи полностью твердотельным, он характеризуется неограниченным сроком службы и не требует какой-либо заправки;
- имеет очень малое время восстановления.

Основные недостатки ферритового ограничителя:

- относительно высокие вносимые потери;
- потребление не очень большого количества мощности;
- высокая чувствительность рабочих характеристик к изменениям температуры окружающей среды;
- его просачивающаяся мощность слишком высока, чтобы приемник мог ее выдержать.

Таким образом, ферритовый ограничитель может быть использован в качестве предварительного ограничительного устройства в сборке защиты приемника, где требуется очень быстрое время восстановления. Обычно за ним следует диодный ограничитель.

Мультипактор

Мультипактор представляет собой вакуумное устройство, в котором применяются вторично-эмиссионные материалы для поглощения большого количества радиочастотной мощности (рис. 10). Он предназначен для использования в качестве полосового фильтра в режиме низкой мощности. Когда входная радиочастотная мощность достигает критического порога, возникает эффект мультипактора, усиленный присутствием материала вторичного излучения. Это приводит к поглощению мощности при прохождении радиочастотной энергии по волноводу. Поглощенная энергия преобразуется в тепло. Хотя его ограничивающее действие пассивно, мультипактору требуется несколько источников постоянного напряжения для работы некоторых из его ключевых компонентов. Помимо этого, устройству необходимо жидкостное охлаждение.

Основные преимущества мультипактора заключаются в том, что он преобразует

большое количество усредненной мощности и имеет практически мгновенное время восстановления (обычно менее 10 нс). Это изделие с ограниченным сроком службы, требующее подачи внешнего постоянного напряжения. Как и в случае с другими рассмотренными технологиями, мультипактор должен быть установлен в паре с диодным ограничителем для уменьшения просачиваемой мощности до уровней, безопасных для приемника.

Диодный ограничитель

С момента своего создания в конце 1960-х годов диодный ограничитель стал фундаментальным строительным блоком практически любой современной конструкции защитного устройства приемника. В значительной степени это связано с тем, что кроме трубки TR активного типа (с электродом поджига), это единственное устройство, способное адекватно защитить современный приемник. Все другие устройства, описанные выше, являются устройствами предварительного ограничения, за которыми для достижения адекватной защиты должен следовать диодный ограничитель.

Диодный ограничитель обладает множеством преимуществ:

- это полностью твердотельное устройство, срок службы которого не ограничен;
- не требует какой-либо заправки;
- может быть пассивным или активным;
- его можно спроектировать как многофункциональный компонент;
- он может быть реализован в минимальных размерах и с минимальными вносимыми потерями;
- может быть реализован в любом типе линии передачи.

Основной фактор, сокращающий применимость диодного ограничителя, — его предельно допустимая мощность. Ранние устройства были способны рассеивать пиковую мощность всего в несколько десятков ватт. Однако за прошедшие годы характе-

ристики диодных ограничителей заметно улучшились. Сегодня они применяются в качестве самостоятельных устройств защиты приемника в приложениях, ранее требовавших дополнительного использования других технологий предварительного ограничения. Мощность, которую способен обработать диодный ограничитель, в первую очередь зависит от рабочей частоты, пиковой мощности и длительности импульса.

Типичный одноступенчатый волноводный диодный ограничитель показан на рис. 11. Диод установлен в перестраиваемой дроссельной секции. В режиме малой мощности диод не проводит ток. Дроссельная секция настроена таким образом, чтобы обеспечить требуемые полосовые характеристики вносимых потерь и КСВН. В состоянии высокой мощности диод начинает проводить ток. Цепь расстраивается, что приводит к высокому отражению. Чтобы завершить цепь постоянного тока, диод может быть посажен на «землю» непосредственно либо через детекторный диод. Детекторные диоды могут быть использованы, чтобы обеспечить более качественный источник тока для обработки высокой мощности или для уменьшения просачиваемой мощности. В зависимости от полосы пропускания, один диодный каскад может обеспечить 15–20 дБ защиты. При необходимости можно добавить дополнительные каскады для достижения желаемой величины ослабления. Конечно, вносимые потери будут увеличиваться по мере добавления каждой ступени.

Ограничение будет начинаться при относительно низких уровнях мощности, обычно при 0...+10 дБм. Таким образом, просачиваемая мощность будет достаточно низкой, и современный приемник будет адекватно защищен. Кроме того, для обеспечения лучшей обработки мощности или уменьшения просачиваемой мощности возможна организация активного управления диодным ограничителем.

У диодных ограничителей есть два основных недостатка. Во-первых, в отличие

от других технологий, рассмотренных выше, они не очень устойчивы к превышению мощности. При воздействии уровня мощности, даже немного превышающего проектную, диодный ограничитель выходит из строя. Во-вторых, они, как правило, не обеспечивают значительной внеполосной защиты. Поэтому, чтобы избежать проблем при рассмотрении вопроса об использовании диодного ограничителя в качестве самостоятельного защитного устройства приемника, необходимо очень тщательно профилировать всю ожидаемую внутрисполосную и внеполосную энергию, которая может попасть на ограничитель.

Защита приемника в сборе

Как уже отмечалось, большинство защитных устройств приемника — это не одиночные компоненты, а сборки, в которых используются два или более блока, основанные на принципах, рассмотренных выше. В большинстве устройств защиты приемника в качестве основного элемента для достижения желаемых уровней защиты используется диодный ограничитель. Помимо этого, в зависимости от конкретных системных требований может быть применена одна или несколько технологий предварительного ограничения. Обычно это делается для достижения желаемого уровня допустимой мощности либо требуемого времени восстановления.

Типичными комбинациями являются:

- ограничитель TR — комбинация трубки TR и диодного ограничителя;
- Pre-TR, ограничитель — комбинация трубки Pre-TR и диодного ограничителя;
- Pre-TR, ограничитель TR — комбинация трубки Pre-TR, трубки TR и диодного ограничителя;
- ферритово-диодный ограничитель — комбинация ферритового ограничителя и диодного ограничителя.

Многие компромиссы, на которые приходится идти при проектировании защитного устройства приемника, слишком сложны, чтобы описать их в краткой статье. Каждое приложение включает различный набор критериев проектирования. Поэтому для конкретного применения требуется своя специальная конструкция защитного устройства приемника.

И последнее замечание. Хотя узел защиты приемника и состоит из отдельных блоков, его всегда следует рассматривать как отдельный компонент. Другими словами, составные блоки никогда не должны быть физически разделены при проектировании системы. Защитные устройства приемника с наилучшими характеристиками — это, как правило, те, составные блоки которых созданы для совместной рабо-



Сергей ШИХОВ, директор по управлению проектами «А-КОНТРАКТ»:

Устройства защиты приемника являются важной частью радиолокационных систем. К выбору принципа работы таких устройств необходимо относиться крайне ответственно, с учетом предполагаемого состояния внешней электромагнитной среды, в которой будет функционировать радиолокационная система.

Данная статья поможет разработчику конечной системы лучше понимать основы проектирования защитных устройств, а именно: какой тип защиты выбрать (активный, пассивный, их комбинацию) и какие составные части включить в систему (разрядники, ферритовые или диодные ограничители и т. п.).

ты. Расстояние между элементами схемы имеет решающее значение, а некоторая настройка является обычной частью изготовления защиты приемника.

Как описать устройство защиты приемника

Для описания требований к защите приемника существует специальный, достаточно полный бланк спецификации, однако могут возникнуть другие нюансы, связанные с конкретным системным приложением. Некоторая запрашиваемая информация — например, отслеживание фазы или STC (Sensitivity Time Control — временная автоматическая регулировка усиления, ВАРУ) может не относиться к конкретному приложению. Однако существует минимальный объем информации, необходимый для любого приложения. Такие пункты отмечены звездочкой (*) на листе спецификации.

Для того, чтобы выбрать наилучшую возможную конфигурацию конструкции, инженеру-проектировщику защитного устройства приемника следует составить как можно более полное представление о предполагаемой среде, в которой ожидается работа устройства. Это должно быть сделано на первом этапе проектирования любой новой системы. Пример описания защитного устройства приемника приведен в [1].



Литература

1. <https://kit-e.ru/teoriya/materialy-k-state/>