

Руководство для начинающих по измерениям с переменной нагрузкой

Елена КИРИЛЕНКО
ekirilenko@maurymw.com

В последние несколько лет измерения при полном сопротивлении нагрузки, отличном от 50 Ом, приобрели особую актуальность. Они применяются при проектировании усилителей, построении и проверке адекватности моделей, функциональных испытаниях, испытаниях на устойчивость к воздействию внешних факторов и во многих других случаях. Начинающим специалистам бывает непросто разобраться в большом объеме информации, существующей по данной теме. В ответ на многочисленные просьбы мы публикуем руководство для начинающих, в котором излагаются основные понятия и принципы измерений с переменной нагрузкой и разъясняется их назначение.

Измерения с переменной нагрузкой (load pull) — это такие измерения, при которых полное сопротивление нагрузки испытываемого устройства регулируется и в общем случае отличается от 50 Ом. При разных значениях полного сопротивле-

ния нагрузки реакция испытываемого устройства различается. Цель измерений — исследовать изменение характеристик устройства или определить его чувствительность к переменной нагрузке. Для измерений с переменной нагрузкой используются тюнеры

импеданса — приборы или устройства, предназначенные для регулирования полного сопротивления.

Ручные микрометрические тюнеры

Наиболее распространенный современный тип тюнера импеданса — ручной микрометрический (рис. 1). Он состоит из прецизионной полосковой линии с волновым сопротивлением 50 Ом, представляющей собой две параллельные пластины с центральным проводником между ними, и металлического зонда (втулки). Когда зонд полностью извлечен из полосковой линии, сигнал проходит через тюнер почти невозмущенным. По мере углубления зонда внутрь полосковой линии электрическое поле сигнала претерпевает все большее возмущение, часть сигнала отражается к испытываемому устройству, и амплитуда отраженного сигнала (и, соответственно, коэффициент отражения Γ и связанный с ним параметр КСВН) растет. С изменением положения зонда относительно испытываемого устройства меняется расстояние между ними, а следовательно, и фаза отражения. Перемещая зонд вверх-вниз и влево-вправо, можно установить практически любое полное сопротивление со стороны испытываемого устройства в пределах всей диаграммы Смита.

Автоматизированные микрометрические тюнеры

Автоматизированный микрометрический тюнер импеданса (рис. 2) работает точно так же, как ручной, но его зонд перемещается не вручную, а с помощью электродвигателей, что обеспечивает высочайшую точ-

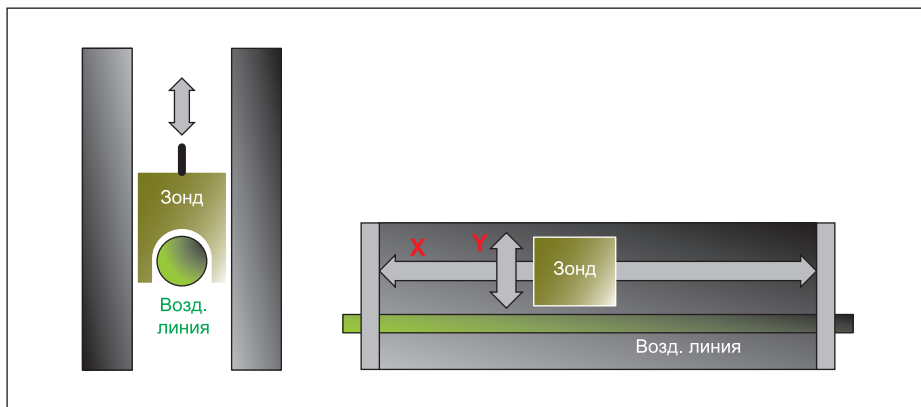


Рис. 1. Ручной микрометрический тюнер импеданса в двух видах

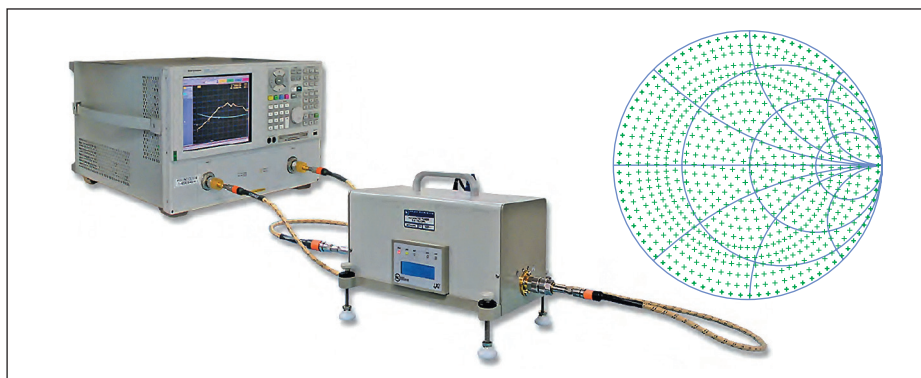


Рис. 2. Автоматизированный микрометрический тюнер импеданса и векторный анализатор цепей

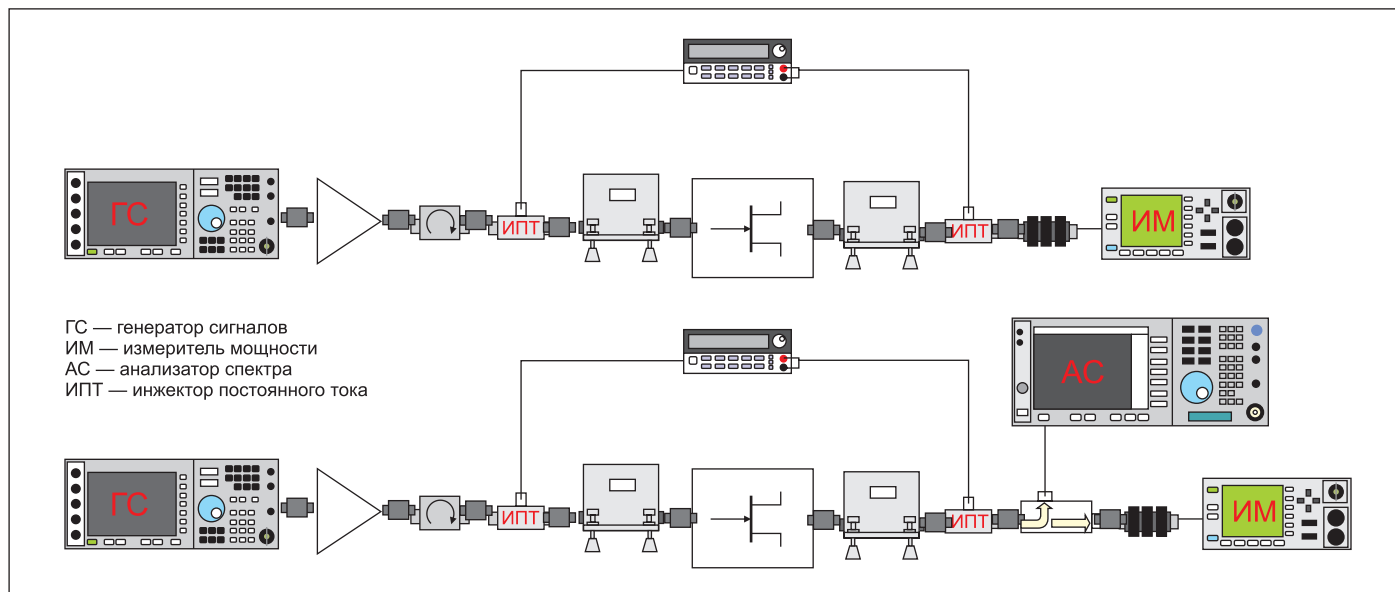


Рис. 3. Традиционные (скалярные) измерения с переменной нагрузкой

ность. Автоматизация позволяет предварительно откалибровать тюнер. Предварительная калибровка — это установление связи между элементами матрицы рассеяния (S -параметрами) и положением зонда по физическим осям X и Y . По итогам этой операции создается таблица подстановки, которая определяет, как установить на тюнере то или иное полное сопротивление со стороны испытываемого устройства. С помощью векторного анализатора цепей и специального программного обеспечения автоматически измеряется зависимость S -параметров от положения зонда, причем его положения обычно выбираются такими, чтобы охватить всю диаграмму Смита.

Применение тюнеров

Современные тюнеры импеданса имеют множество применений. В общем случае они служат эффективным вспомогательным средством для проектирования и испытаний различных компонентов, цепей и систем. С помощью тюнеров импеданса можно определять оптимальное значение полного сопротивления для согласования по мощности, коэффициенту усиления, КПД, коэффициенту шума и другим параметрам при проектировании усилителей. По результатам измерений, выполненных с применением тюнеров, можно строить модели устройств (компактные, поведенческие или на основе баз данных). Тюнеры позволяют также проверять адекватность моделей, сравнивая результаты модельных расчетов с фактическими данными измерений. Посредством тюнеров можно исследовать поведение испытываемого устройства в зависимости от степени рассогласования, то есть измерять ухудшение его характеристик с отклонением полного сопротивления нагрузки от 50 Ом. Наконец, тюнеры можно использовать для испытания готовых систем, таких как мобильные телефоны, радиоприемники и приемопередатчики. Как можно видеть, при всей своей простоте тюнеры весьма универсальны.

Традиционные (скалярные) измерения с переменной нагрузкой

При традиционных, скалярных измерениях с переменной нагрузкой автоматические тюнеры импеданса используются для регулирования полного сопротивления источника сигнала и нагрузки испытываемого устройства, а в роли основного измерительного прибора выступает скалярный измеритель мощности. Мощность измеряется в сечении датчика мощности, после чего измеренное значение математически приводится к сечению испытываемого устройства с учетом

пассивных потерь на участке между датчиком мощности и испытываемым устройством, включая потери в тюнере, которые меняются в зависимости от установленного полного сопротивления (положения зонда). Датчик мощности широкополосный и измеряет мощность во всей полосе частот, включая основную частоту и гармоники. Добавив анализатор спектра (или мультиплексор с несколькими датчиками мощности), можно измерять мощность на конкретных частотах, в том числе мощность продуктов перекрестной, если сигнал на входе двухтональный. В зависимости от источника сигнала и анализатора спектра возможны генерация и измерение параметров непрерывных сигналов, радиоимпульсов, одно-, двухтональных и модулированных сигналов (рис. 3).

Векторные измерения с переменной нагрузкой

При векторных измерениях с переменной нагрузкой используются те же автоматизированные тюнеры импеданса для регулирования полного сопротивления источника сигнала и (или) нагрузки испытываемого устройства. Но вместо скалярного измерителя мощности предусмотрен векторный приемник (обычно входящий в состав векторного анализатора цепей), с помощью которого измеряются векторные a - и b -волны в сечении испытываемого устройства. Для этого напрямую к входу приемника векторного анализатора подключаются выходы ответвителей с малым затуханием, включенных между тюнерами и испытываемым устройством, и система калибруется в сечении испытываемого устройства. Для каждой частоты измеряются значения параметров a_1 , b_1 , a_2 и b_2 , по которым рассчитываются располагаемая и подводимая входная мощность, выходная мощность, коэффициент передачи преобразователя, коэффициент передачи мощности, КПД и истинный КПД по добавленной мощности. Кроме того, поскольку калибровка производилась в сечении испытываемого устройства, можно измерять полное входное сопротивление на больших сигналах в режиме реального времени, отслеживать возникновение автоколебаний (при $\Gamma_{вх} > 1$) и измерять рассогласование для вычисления фактической входной мощности, подводимой к испытываемому устройству. Можно также самостоятельно измерить полное сопротивление тюнеров со стороны испытываемого устройства, не полагаясь на результаты предварительной калибровки полного сопротивления и потерь. Наконец, так как измерения производятся в сечении испытываемого устройства, нет нужды в математических преобразованиях для приведения к другому сечению, следовательно, устраняется один из источников ошибок в измерениях. Подобно ска-

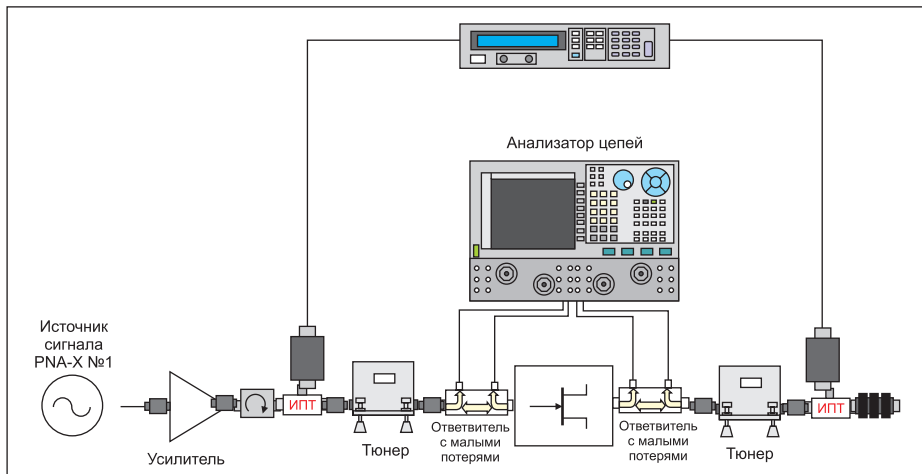


Рис. 4. Векторные измерения с переменной нагрузкой

ную нагрузку можно использовать в качестве замены пассивному тюнеру или для усовершенствования системы на базе тюнеров. Если расположить активную переменную нагрузку за тюнером импеданса, мощность ее собственного сигнала будет складываться с мощностью отраженного сигнала пассивного тюнера, за счет чего можно повысить коэффициент отражения. Кроме того, в сочетании с пассивными тюнерами она позволяет легко регулировать импеданс на частотах гармоник, а также может использоваться в самостоятельном виде с множеством активных контуров регулирования для измерений с переменной нагрузкой на частотах гармоник.

Широкополосная активная схема измерений с переменной нагрузкой

Широкополосная активная схема измерений с переменной нагрузкой — это модификация незамкнутой активной схемы, в которой создается новый сигнал с параметрами, подобранными таким образом, чтобы удовлетворялось уравнение $\Gamma = a2/b2$. Однако в данном случае мы имеем дело не с одной частотой или набором гармоник, а с широкополосным набором частот (рис. 6), охватывающим полосу частот модуляции реального сигнала связи. Используя широкополосные генератор сигналов произвольной формы и АЦП, можно регулировать полное сопротивление со стороны испытываемого устройства в полосе частот шириной до 240 МГц. Активная схема измерений с переменной нагрузкой применима для модулированных сигналов, а так-

лярному случаю, возможны генерация и измерение параметров непрерывных сигналов, радиоимпульсов, одно- и двухтональных сигналов. По умолчанию измерения выполняются на отдельных частотах, поскольку а и b-волны зависят от частоты (рис. 4).

Некоторые современные векторные анализаторы цепей поддерживают нелинейные векторные измерения, в том числе снятие сигнальных кривых напряжения (тока) и нагрузочных кривых во временной области, что может пригодиться при изучении классов работы испытываемого устройства. Переход от линейных векторных измерений с переменной нагрузкой к нелинейным элементарен: если векторный анализатор цепей позволяет выполнять нелинейные измерения, то и вся система пригодна для этой цели.

Активная и активно-пассивная схемы измерений с переменной нагрузкой

В описанной выше пассивной схеме (рис. 5а) полное сопротивление нагрузки регулировалось с помощью микрометрического тюнера, отражающего часть сигнала к выходу испытываемого устройства. Но полное сопротивление нагрузки испытываемого устройства равняется отношению отраженного сигнала $a2$ к прямому сигналу $b2$. Таким образом, перемещая зонд тюнера, мы изменяем амплитуду и фазу отраженного сигнала $a2$, что равносильно изменению амплитуды и фазы полного сопротивления нагрузки.

В активной схеме измерений с переменной нагрузкой вместо пассивного тюнера, который отражает сигнал в направлении испытываемого устройства, используют один из двух вариантов: либо меняют амплитуду и фазу сигнала и заводят его обратно в цепь (замкнутая активная схема), либо подают исходный сигнал на согласованную нагрузку и создают новый сигнал, распространяющийся в обратном направлении (незамкнутая активная схема).

Преимущество замкнутой активной схемы (рис. 5б) — отсутствие необходимости в отдельном источнике обратного сигнала и более высокая начальная мощность сигнала до усиления ($P_{\text{вых}}$ испытываемого устройства). Одним из недостатков этой схемы является возможность возникновения автоколебаний из-за наличия обратной связи.

Достоинства незамкнутой активной схемы — простота в реализации и управлении, а также отсутствие риска автоколебаний в большинстве случаев. К минусам относится необходимость в дополнительных источниках сигнала и более мощных усилителях для достижения тех же результатов (рис. 5в).

В настоящее время незамкнутая активная схема измерений с переменной нагрузкой более популярна из-за своей устойчивости и простоты реализации. Активную перемен-

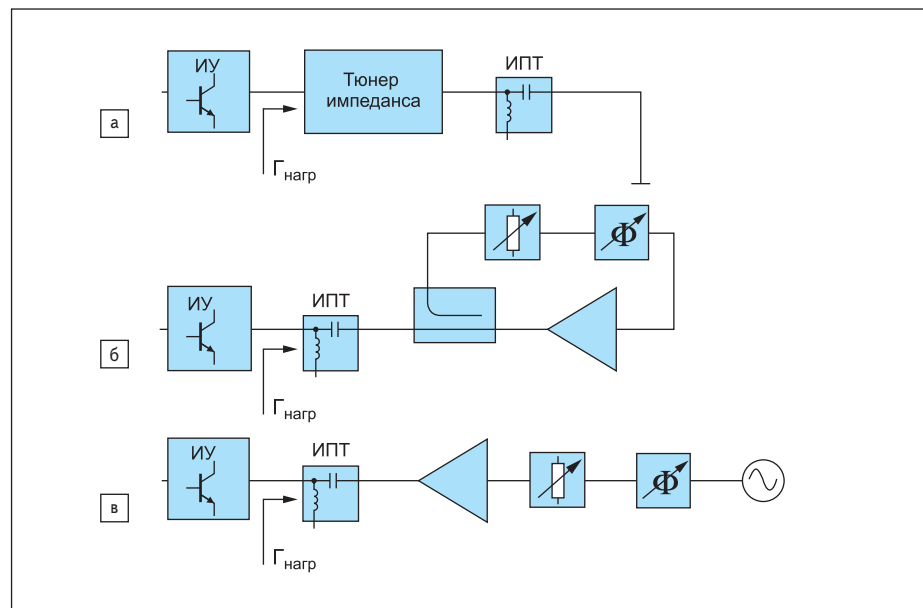


Рис. 5. Активная и активно-пассивная схемы измерений с переменной нагрузкой:
 а) схема пассивных измерений с переменной нагрузкой;
 б) замкнутая активная схема измерений с переменной нагрузкой;
 в) незамкнутая активная схема измерений с переменной нагрузкой

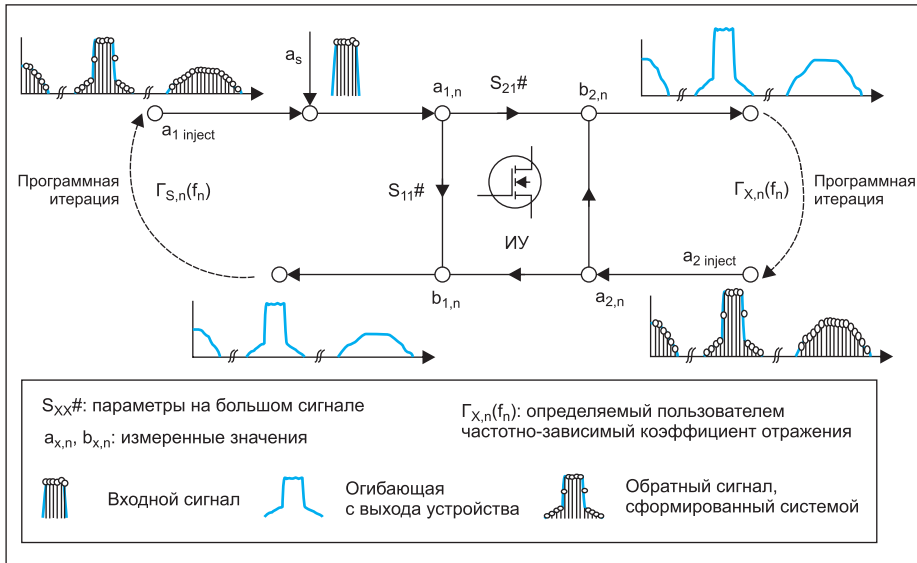


Рис. 6. Алгоритм широкополосной генерации и анализа сигнала

же для одно- и двухтональных непрерывных сигналов и радиоимпульсов. С ее помощью можно компенсировать и эффекты фазовой задержки в измерительных системах, которые в ряде случаев ухудшают характеристики этих систем в диапазоне СВЧ.

Методы широкополосной генерации и анализа сигналов применимы также и для однотональных сигналов, мультиплексированных во временной области. В этом варианте вместо единого сигнала, соответствующего одному значению полного сопротивления, исследуется составной сигнал, амплитуды и фазы отрезков которого соответствуют разным значениям полного сопротивления при одном и том же однональном сигнале (рис. 7).

Таким способом можно измерять порядка 1000 пар значений полного сопротивления и мощности в минуту.

Измерения с переменной нагрузкой на частотах гармоник

Измерения с переменной нагрузкой на частотах гармоник — это разновидность измерений с переменной нагрузкой, в которой полное сопротивление нагрузки регулируется не только на основной частоте сигнала, но и на частотах его гармоник. Способы их выполнения могут различаться в зависимости от выбранного базового метода измере-

ний (традиционный скалярный или векторный). В простейшей пассивной схеме измерений с переменной нагрузкой на частотах гармоник используется несколько тюнеров (по одному на каждую частоту), включенных через мультиплексоры, чтобы воздействие каждого тюнера ограничивалось только соответствующей узкой полосой частот.

Другой пассивный вариант — схема с каскадным расположением тюнеров (внутренним или внешним), где количество зондов равняется количеству гармоник, на которых требуется регулировать полное сопротивление. В этом случае положения зондов, при которых обеспечиваются заданные значения полного сопротивления на всех частотах, определяются математически.

Измерения с переменной нагрузкой на частотах гармоник могут выполняться и по описанной ранее активной схеме: для каждой частоты предусматривается отдельный активный источник сигнала и параметры обратной волны a_2 на каждой из гармоник устанавливаются такими, чтобы удовлетворялось уравнение $\Gamma_{nf} = a_{2nf}/b_{2nf}$.

Подача смещения на устройство при измерениях с переменной нагрузкой

В большинстве случаев для подачи смещения на испытываемое устройство можно использовать любой источник постоянного тока. Но бывают ситуации, когда постоянное смещение не лучший вариант. Например, если входной сигнал устройства представляет собой радиоимпульсы, то потребляемый от источника ток будет модулироваться этими радиоимпульсами, поэтому важно измерить осциллографом смещение на пике импульса. Другой выход — использовать импульсное смещение, синхронизированное с радиоимпульсным сигналом. Это не только избавляет от необходимости в осциллографе (если импульсный источник питания оснащен средствами измерения), но и снижает общую температуру испытываемого устройства и позволяет избежать его саморазогрева.

Выводы

Измерения с переменной нагрузкой — один из важнейших инструментов, используемых при проектировании, испытаниях и проверке адекватности моделей усилителей, а также при аттестации модулей различных систем по результатам испытаний. Существуют разные методы регулирования полного сопротивления нагрузки, выбор которых зависит от предъявляемых требований. Подробное описание каждого метода заслуживает отдельной статьи. Цель настоящей публикации — изложить основы измерений с переменной нагрузкой и познакомить читателя со средствами таких измерений.

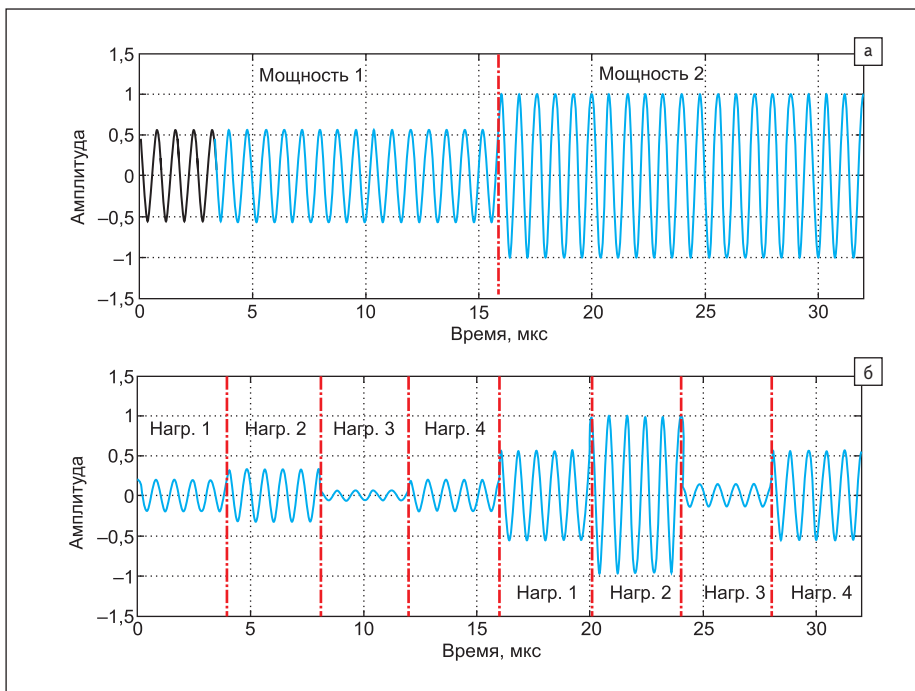


Рис. 7. Мультиплексирование сигнала во временной области: а) входной РЧ-сигнал; б) выходной РЧ-сигнал на нагрузке