

Аппаратно-программный комплекс для автоматизированного измерения параметров усилителей мощности

К.С. Жохов, А.В. Димаки, М.В. Синогин

ООО «НПК ТАИР»

Аннотация: в данной работе описан разработанный в ООО «НПК ТАИР» аппаратно-программный комплекс на основе векторных анализаторов цепей, который позволяет в автоматизированном режиме измерять зависимость точки компрессии и максимальной мощности по выходу усилителя от частоты, а также уровни гармонических составляющих и интермодуляционных искажений выходного сигнала. Комплекс автоматизирует процесс калибровки измерительного стенда, а также обеспечивает необходимую математическую обработку и визуализацию результатов измерений.

Ключевые слова: усилитель, векторный анализатор цепей, компрессия, согласование

1. Введение

Одним из самых распространенных типов СВЧ-устройств являются усилители мощности, используемые во множестве отраслей: от медицины и измерительной техники до аэрокосмических технологий. Для применения усилителей мощности в схемах необходимо знать их характеристики, в том числе: выходную мощность, коэффициент усиления, гармоники и интермодуляционные составляющие выходного сигнала. Эффективное получение данных характеристик возможно при помощи векторных анализаторов цепей (ВАЦ) за счет применения векторной коррекции и других стандартных калибровок. Несмотря на это, «сырые» измерения мощности и S-параметров, получаемые ВАЦ, не дают исчерпывающей информации о характеристиках усилителей, в частности, из-за наличия рассогласования по входу и выходу исследуемого усилителя с портами ВАЦ, а также в связи с необходимостью дополнительной математической обработки результатов измерений [1]. Сказанное обуславливает необходимость создания программно-аппаратного комплекса для автоматизированного измерения параметров усилителей. Такой комплекс должен позволять в автоматическом режиме учитывать рассогласование по входу и выходу усилителя с портами векторного анализатора цепей, обеспечить высокую точность определения точки компрессии и высокую скорость измерений с возможностью определения параметров усилителя в «горячем» режиме работы, а также удобный интерфейс пользователя.

2. Описание измерительной установки

В ООО «НПК ТАИР» разработан программно-аппаратный комплекс для автоматизированного измерения рабочих параметров усилителей мощности, включающий в себя измерительный стенд на основе одного или двух ВАЦ, управляющую ЭВМ и специализированное программное обеспечение.

В зависимости от требований к точности измерений и имеющихся в наличии ВАЦ возможны различные конфигурации измерительных стендов. В простейшем случае измерительный стенд включает в себя один двухпортовый ВАЦ, к портам которого подключается исследуемый усилитель при помощи соединительных кабелей. Такой стенд может быть реализован на основе ВАЦ производства ООО «Планар» С1220 с

диапазоном частот до 20 ГГц или S50244 с диапазоном частот до 44 ГГц [2, 3]. Несмотря на простоту и доступность данного стенда, он обладает существенным ограничением – невозможность измерения S-параметров усилителя в «горячем» режиме работы, а именно коэффициента отражения S22 по выходу усилителя под нагрузкой, необходимого для коррекции рассогласования измерительного приёмника и выхода усилителя. При использовании одного двухпортового прибора при измерении S22 подача сигнала с первого порта отключается и вместо этого подаётся сигнал на второй порт. В результате усилитель не принимает никакого входного сигнала и измерение происходит в «холодном» режиме, что не соответствует реальной рабочей ситуации.

Для получения корректных значений параметра S22, соответствующих работе усилителя под нагрузкой, требуется реализовать «горячий» режим измерения, при котором усилитель принимает входной сигнал на частоте f_1 , в то же самое время выполняется измерение отражения по выходу усилителя на частоте $f_2 = f_1 + \Delta f$. Значение Δf должно быть выбрано таким, чтобы значение S22 на частоте f_1 не слишком отличалось от его значения на частоте f_2 . С другой стороны, чтобы гарантировать достаточное разделение сигналов, частотный промежуток Δf должен быть в три-пять раз больше полосы пропускания фильтра ПЧ. Значение Δf , задаваемое в программном обеспечении по умолчанию, составляет $\Delta f = 100 \text{ МГц}$.

Для реализации измерений усилителей мощности в «горячем» режиме работы необходим измерительный стенд с двумя генераторами ВЧ сигнала, реализованный на базе пары двухпортовых ВАЦ или одного четырехпортового ВАЦ с двумя источниками, например, ВАЦ С2420 производства ООО «Планар» [2]. Схема стенда с двумя двухпортовыми ВАЦ представлена на рис. 1.

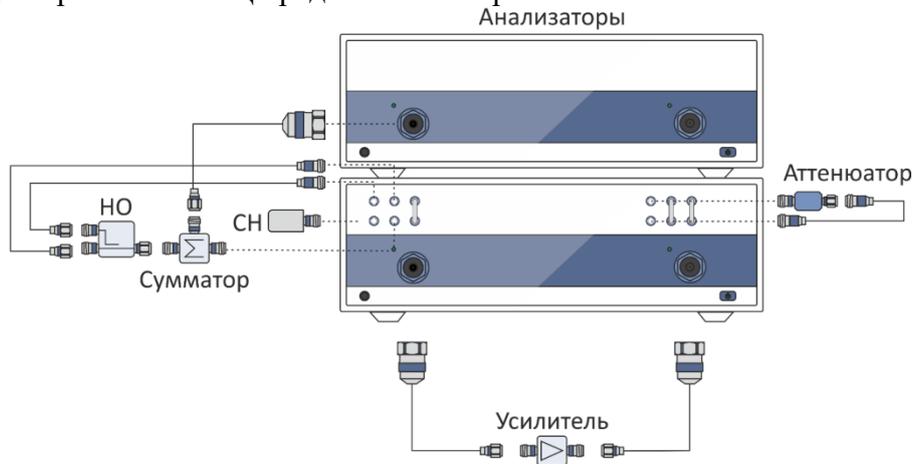


Рисунок 1. Измерительный стенд с двумя двухпортовыми ВАЦ

Для корректной работы данного измерительного стенда необходимо синхронизировать работу анализаторов: путем соединения выхода Ext Trig Out первого ВАЦ со входом Ext Trig In второго ВАЦ. В случае использования стенда с одним четырехпортовым ВАЦ необходимо обеспечить синхронную перестройку частоты двух встроенных генераторов ВЧ сигнала. Схема измерительного стенда с одним четырехпортовым ВАЦ, имеющим два источника ВЧ сигнала, представлена на рис. 2.

Использование приборов с внешними переключателями с прямым доступом к приёмникам позволяет модифицировать схему выдачи и приема сигнала для специальных измерительных задач. Например, может потребоваться использование дополнительного предусилителя, если стандартной выходной мощности ВАЦ недостаточно для выведения измеряемого усилителя мощности в рабочий режим и/или

в режим насыщения.

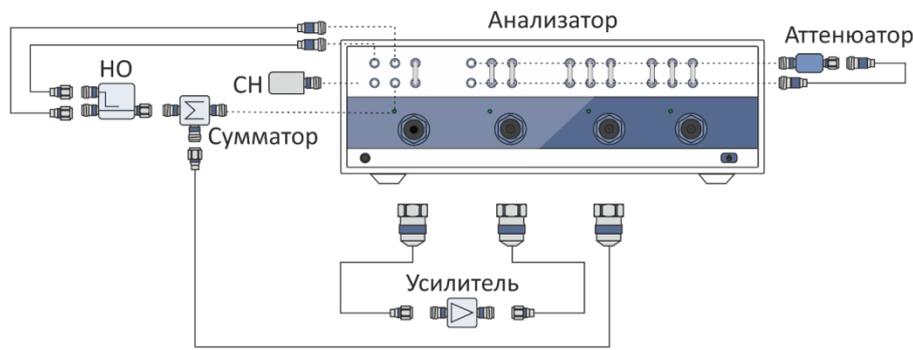


Рисунок 2. Измерительный стенд с четырехпортовым ВАЦ

Известно, что реальная зависимость выходной мощности от входной является нелинейной. Уровень мощности P_1 , при котором отличие выходной мощности от линейной зависимости составляет 1 дБм, представляет значительный интерес при проектировании усилительных трактов. При измерении точки компрессии P_1 возникает проблема ограничения точности получаемого результата шагом качания мощности по входу усилителя. Для решения данной проблемы реализован адаптивный алгоритм поиска P_1 , который включает следующие основные шаги.

1. Получение «грубой» оценки P_1 за одно качание по мощности;
2. Разделение участка $\Delta P_1 \pm P_{in}$ на 10 равных отрезков;
3. Проведение поточечного измерения P_{out} на участке диапазона $\Delta P_1 \pm P_{in}$;
4. Поиск уточненной оценки P_1 в измеренном узком диапазоне мощностей;
5. Если значение модуля разницы измеренной выходной мощности и линейной аппроксимации удовлетворяет заданной точности, то поиск заканчивается, если нет, то алгоритм возвращается к п.2 уже вблизи новой P_1 .

Вне зависимости от желаемой точности нахождения P_1 , число повторений цикла не может превышать 10, что исключает «зацикливание» алгоритма, например, вследствие влияния шумов измерений.

Для повышения точности результатов измерения параметров усилителей применяется коррекция рассогласования по входу и выходу усилителя с портами ВАЦ. С этой целью во время выполнения калибровки выходной мощности выполняется расчет составляющих трекинга опорного приёмника RRF по формуле (1) и составляющих трекинга измерительного приёмника BTF по формуле (2).

$$RRF = \frac{R1}{corrPow * |1 - ES11 * S11|} , \quad (1)$$

$$BTF = |ET21| * RRF. \quad (2)$$

Рассчитанные составляющие используются для коррекции показаний измерительного и опорного приемников ВАЦ ($R1$ и $B1$ соответственно) с учетом рассогласования усилителя по входу (3) и по выходу (4).

$$R1_{corr} = \frac{R1}{RRF * |1 - ES11 * S11|} , \quad (3)$$

$$B1_{corr} = \frac{B1}{BTF} * |1 - EL21 * S22|. \quad (4)$$

Реализованная коррекция рассогласования позволила уменьшить максимальную абсолютную ошибку измерения выходной мощности с 1.5 дБм до 0.03 дБм.

3. Выполнение калибровок измерительного стенда

Для достижения требуемой точности измерений необходимо выполнить ряд калибровок. Процесс выполнения калибровок автоматизирован средствами разработанного управляющего программного обеспечения, в котором для каждой калибровки отображается схема соединений стенда, подключений мер и измерительных устройств, а также приведен список шагов, необходимых для выполнения данной калибровки. До начала проведения калибровок необходимо задать следующие параметры анализатора: 1) начальное и конечное значение частотного диапазона (Гц); 2) количество измеряемых частотных точек; 3) мощность, на которой будет выполняться калибровка (дБм); 4) полоса фильтра ПЧ (Гц).

Калибровки необходимо выполнять строго по очереди. Для управления и мониторинга их состоянием в программе выделена специальная область во вкладке «Калибровки». После проведения первой калибровки возможность редактирования калибровочных параметров блокируется для того, чтобы все калибровки выполнялись строго в одном и том же диапазоне параметров анализатора. Блокировка калибровочных параметров снимается в том случае, если пользователь сбросит все сделанные калибровки.

В комплект калибровок измерительного стенда входят:

1. Полная двухпортовая векторная калибровка по сечениям подключения измеряемого усилителя;
2. Измерение потерь в коаксиальном переходе (адаптере), используемом при подключении измерителя мощности;
3. Калибровка выходной мощности основного генератора ВЧ сигнала;
4. Калибровка опорного приёмника.
5. Опциональные калибровки для измерения гармоник, интермодуляционных искажений и точек их пересечения включают;
6. Калибровка выходной мощности вспомогательного генератора ВЧ сигнала;
7. Калибровка приёмника.

После выполнения всех необходимых калибровок можно переходить к измерению параметров исследуемого усилителя.

4. Результаты измерения характеристик усилителя

Реализованный аппаратно-программный комплекс был успешно применен для исследования характеристик СВЧ-усилителя ADT2-0222, разработанного в ООО «НПК ТАИР». Использовалась схема измерительного стенда с двумя двухпортовыми ВАЦ, приведенная на рисунке 2. Были получены зависимости выходной мощности и коэффициента передачи S_{21} от мощности сигнала по входу усилителя (см. рис. 3а), определены точки P_1 и P_{\max} (максимальная мощность по выходу усилителя) для различных частот входного сигнала. Программное обеспечение позволяет получать эти же характеристики в панорамном режиме сканирования по частоте (см. рис. 3б).

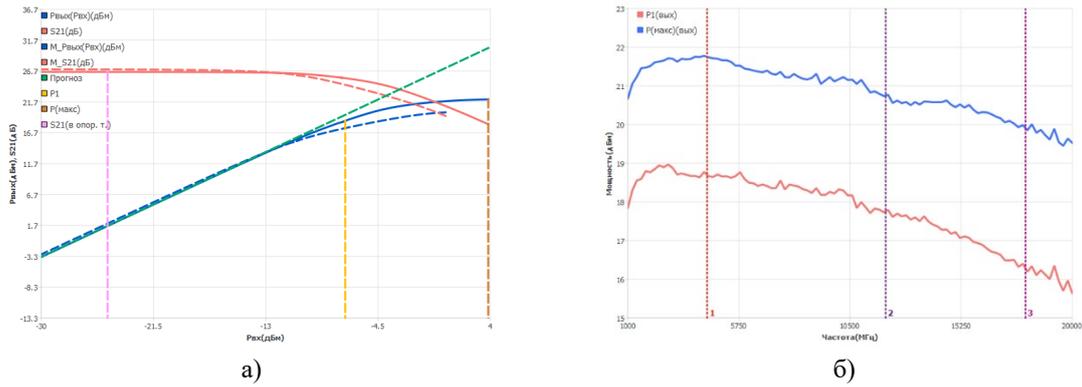


Рисунок 3. Зависимости P1 от входной мощности усилителя (а); зависимости P1 и максимальной мощности по выходу усилителя от частоты (б), полученные при помощи разработанного аппаратно-программного комплекса.

В ряде случаев представляет интерес оценивание относительных амплитуд гармонических составляющих выходного сигнала в зависимости от частоты при фиксированном уровне входной мощности. Разработанный аппаратно-программный комплекс позволяет измерять до пяти гармоник выходного сигнала (см. рис. 4а), их количество ограничивается, в основном, частотным диапазоном используемого ВАЦ. Также возможно измерение интермодуляций 3-го и 5-го порядков при подаче на вход усилителя суммы сигналов различной частоты с двух источников (см. рис. 4б).

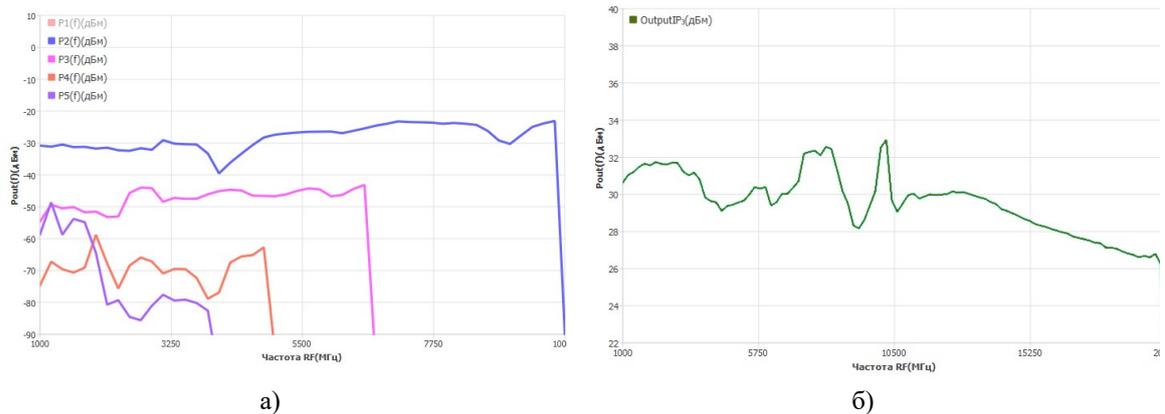


Рисунок 4. Зависимости гармонических составляющих выходного сигнала усилителя (а) и интермодуляций (б) от частоты, полученные при помощи разработанного аппаратно-программного комплекса.

5. Заключение

Применение разработанного аппаратно-программного комплекса для автоматизации измерения параметров усилителей позволяет ускорить проектирование сложных электронных систем, упрощает труд инженера-проектировщика и минимизирует составляющие погрешности, обусловленные как ошибками человека, так и физическим рассогласованием измеряемого устройства и портов ВАЦ. Комплекс прошел успешную апробацию на площадке ООО «НПК ТАИР» при массовом измерении характеристик широкополосных усилителей мощности в диапазоне до 44 ГГц.

Реализация измерительных стендов с двумя генераторами ВЧ сигнала позволила производить измерения в «горячем» режиме работы, в том числе параметра S22, необходимого для коррекции рассогласования выхода исследуемого усилителя и

входа измерительного приёмника ВАЦ. Разработанный адаптивный алгоритм поиска точки однодецибельной компрессии усилителя позволил с высокой точностью (до 0.03 дБм) определять P1 усилителя, что обеспечивается адаптивным шагом качания по мощности.

Список литературы

1. Дансмор Д.П. Измерения параметров СВЧ устройств с использованием передовых методик векторного анализа цепей – М.: Техносфера, 2018. – 736 с.
2. Измерители комплексных коэффициентов передачи и отражения/векторные анализаторы цепей [Электронный ресурс]. – <https://www.planarchel.ru/Products/Measurement%20instrument>.
3. Руководство по эксплуатации и технические характеристики векторных анализаторов цепей серии Cobalt. – Планар, 2019 – 103 с.