

УДК 621.385.633

Исследование непрерывных широкополосных сигналов в режиме импульсного питания приборов СВЧ

**И. В. Ошкин, В. Б. Профе, К. В. Троцюк,
А. И. Гузов, Е. А. Копелович**

Предложен метод для исследования спектральных характеристик непрерывных широкополосных сигналов приборов СВЧ в импульсном режиме от высоковольтных источников питания. Представлены результаты измерения спектральных характеристик резонансного СВЧ-генератора О-типа, полученные с помощью данного метода.

Введение

Экспериментальные работы по исследованию спектральных характеристик непрерывных сигналов приборов СВЧ повышенной мощности связаны с большими тепловыми нагрузками на основные функциональные узлы [1]. Процессы предварительной настройки, входного контроля и исследования в предельных режимах требуют длительного времени работы прибора, что в некоторых случаях может привести к возникновению дефектов или разрушению его функциональных узлов. Существенно снизить тепловые нагрузки возможно в импульсном режиме работы прибора. В отличие от непрерывного режима питания импульсный режим позволяет измерять спектральные характеристики выходного сигнала прибора СВЧ в тех же диапазонах напряжений питания и токов пучка при значительном снижении тепловых нагрузок на функциональные узлы прибора и основную нагрузку СВЧ [2, 3]. Спектральные характеристики прибора СВЧ исследуют с помощью осциллографа с встроенным фильтром быстрого преобразования Фурье (БПФ) или с помощью анализатора спектра (АС). Выбор измерительного оборудования зависит от частотного диапазона, требований к разрешающей способности спектрального анализа и его стоимости. Кроме того, при исследовании сложных сигналов, в частности при анализе сложномодулированных сигналов, разрешающей способности спектрального анализа осциллографа недостаточно. Поэтому важной и актуальной задачей является разработка методов проведения исследований непрерывных широкополосных сигналов в импульсном режиме в зависимости от параметров измерительного оборудования и технических характеристик высоковольтного источника питания.

Целью данной работы является разработка методов проведения экспериментальных исследований амплитудного спектра непрерывных сигналов при импульсном режиме электропитания приборов СВЧ.

Условия проведения исследований

Схема проведения исследований (рис. 1) включает генератор сигналов произвольной формы (ГСПФ), АС с рабочей полосой до 13 ГГц и высокоскоростной цифровой осциллограф с полосой пропускания до 1 ГГц и встроенной опцией БПФ. ГСПФ позволяет смоделировать выходной сигнал в условиях импульсного электропитания, представляющий собой периодическую последовательность радиоимпульсов с широкополосным высокочастотным заполнением, в качестве которого используется сигнал типа «меандр» с частотой следования 5 МГц. Спектр сигнала представляет собой только нечетные гармоники, убывающие по амплитуде пропорционально номеру гармоники. Сформированный сигнал последовательности радиоимпульсов с выхода ГСПФ поступает на вход АС и вход осциллографа, позволяя проводить сравнительную оценку спектров выходного сигнала в зависимости от параметров импульсной последовательности ГСПФ.

Параметры импульсной последовательности ГСПФ выбираются в соответствии с техническими характеристиками высоковольтного источника питания прибора СВЧ и исходя из возможности качественно оценить искажения спектра в зависимости от временного соотношения длительности радиоимпульсов $\tau_{\text{имп}}$ и времени свипирования $t_{\text{св}}$ АС.

Время свипирования по частоте $t_{\text{св}}$ АС (длительность развертки) – время, за которое АС осуществляет один полный цикл развертки по частоте, от начальной частоты полосы обзора до конечной. Минимально возможное время свипирования используемого АС – 2 мс для измерения 201 точки спектрограммы. Однако при установленной полосе обзора в 200 МГц на каждый мегагерц полосы обзора приходится один отсчет частоты, что может быть критично при проведении исследовательских работ. Поэтому в нашем случае условно принято минимально возможное время свипирования $t_{\text{св}} = 4$ мс при измерении 401 точки спектрограммы сигнала при разрешении с полосой 200 МГц.

В качестве высоковольтного источника питания СВЧ-генератора используется импульсный источник питания (ИИП) со следующими техническими характеристиками блока коммутатора:

- диапазон регулирования длительности импульса – 100–2000 мкс;
- диапазон регулирования периода повторения импульсов – 1–1000 мс;
- минимальная скважность импульсной последовательности – 5;
- минимальная длительность переднего и заднего фронтов выходного напряжения – 20 мкс.

В условиях импульсного питания появляются составляющие, обусловленные переходными процессами на

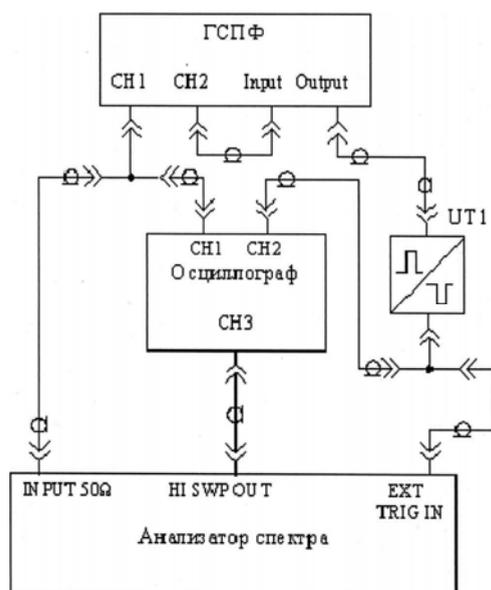


Рис. 1. Схема проведения исследований

переднем и заднем фронтах радиоимпульса (импульса высокого напряжения ИИП). Для исключения спектральных составляющих, обусловленных переходными процессами, запуск развертки АС должен быть задержан на время длительности переднего фронта радиоимпульса и должен завершиться до начала заднего фронта радиоимпульса. Это обеспечивается искусственным введением задержки запуска развертки и времени свипирования АС $t_{св} = 4$ мс. На осциллографе для исключения спектральных составляющих, обусловленных переходными процессами на переднем фронте, устанавливается время задержки t_3 , превышающее длительность переднего фронта $t_{пф}$ радиоимпульса для ИИП не менее чем на 20 мкс.

В работе рассматриваются три случая возможного соотношения параметров импульсной последовательности радиоимпульсов ГСПФ и времени свипирования по частоте $t_{св}$ АС: $\tau_{имп} = t_{св}$; $\tau_{имп} < t_{св}$; $t_{св} > 3T_{имп}$, где $T_{имп} = 50$ мс – период последовательности радиоимпульсов.

Результаты исследований

На рис. 2, 5, 7 и 9 осциллограмма 1 соответствует сигналу на выходе ГСПФ (на входе АС), осциллограмма 2 – сигналу внешней синхронизации АС, осциллограмма 3 – сигналу выполнения цикла развертки АС.

На рис. 2 показана осциллограмма непрерывного сигнала на выходе ГСПФ, на рис. 3 – спектрограмма сигнала при непрерывной генерации с внутренним запуском развертки АС. Спектрограмма непрерывного сигнала является образцовой и необходима для проведения сравнительного анализа со спектрограммами, полученными при измерениях в импульсных режимах.

На рис. 4 показана спектрограмма, полученная с помощью осциллографа, со встроенной опцией БПФ временной реализации фрагмента радиочастотной составляющей сигнала.

Рассмотрим случай, когда длительность радиоимпульса $\tau_{имп}$ на входе АС равна времени свипирования $t_{св}$ и составляет 4 мс (рис. 5). На рис. 6 представлена спектрограмма сигнала, полученная АС. Как видно из рис. 6, при таком соотношении длительности радиоимпульса и времени свипирования спектрограмма полностью идентична спектрограмме, полученной при непрерывной генерации. В этом случае выполняется условие непрерывного сигнала радиочастотного заполнения на входе АС во время выполнения полного цикла развертки по частоте. Такая же картина наблюдается при $\tau_{имп} > t_{св}$ при условии, что сигнал радиочастотного заполнения стационарен ($T/\tau_{имп} = \text{const}$) во время выполнения цикла развертки АС.

На рис. 7 показана осциллограмма, полученная при $\tau_{имп} < t_{св}$. Если длительность радиоимпульса соответствует наименьшей длительности импульса блока коммутатора ИИП $\tau_{имп} = 100$ мкс, то на спектре радиочастотного заполнения достоверно виден лишь короткий начальный участок действительного спектра (рис. 8). Если длительность радиоимпульса на входе АС $\tau_{имп} = 2$ мс (в два раза меньше $t_{св} = 4$ мс), то наблюдаемая спектрограмма (рис. 9) соответствует спектрограмме в непрерывном режиме лишь до половины развертки АС, когда с момента ее запуска прошло 2 мс, т. е. время, равное длительности радиоимпульса. Однако спектрограммы, полученные с помощью осциллографа для случаев $\tau_{имп} = 100$ мкс и 2 мс, не имеют подобных искажений и полностью соответствуют спектрограмме в непрерывном режиме. Это означает, что применение метода измерения спектра высокочастотного заполнения радиоимпульсов с использованием АС ограничивается минимальным временем свипирования по частоте, следовательно, длительности измеряемых радиоимпульсов не должны быть меньше этой величины.

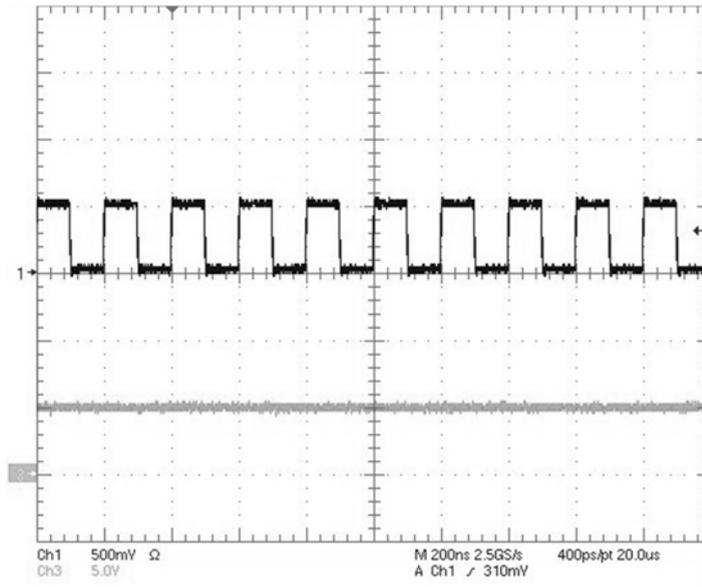


Рис. 2. Непрерывная генерация сигнала

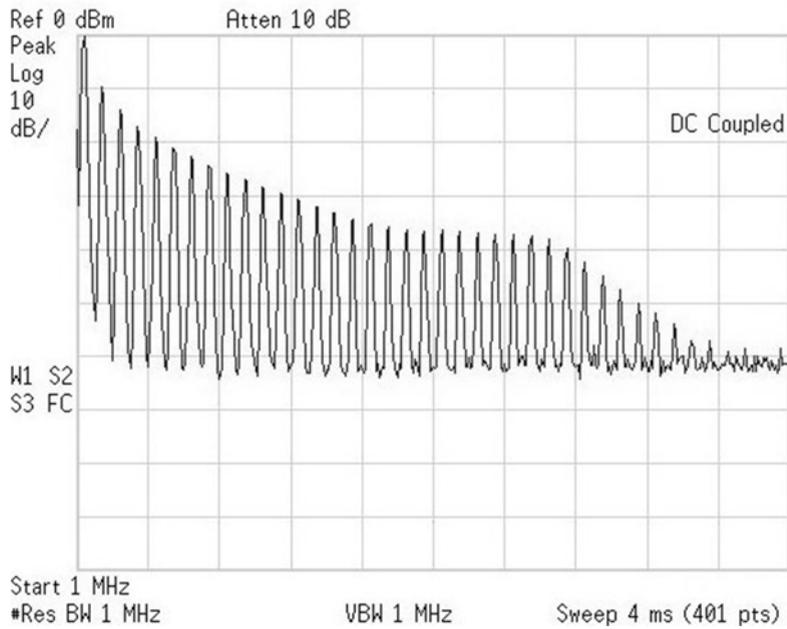


Рис. 3. Спектр радиочастотного заполнения при непрерывной генерации, полученный анализатором спектра

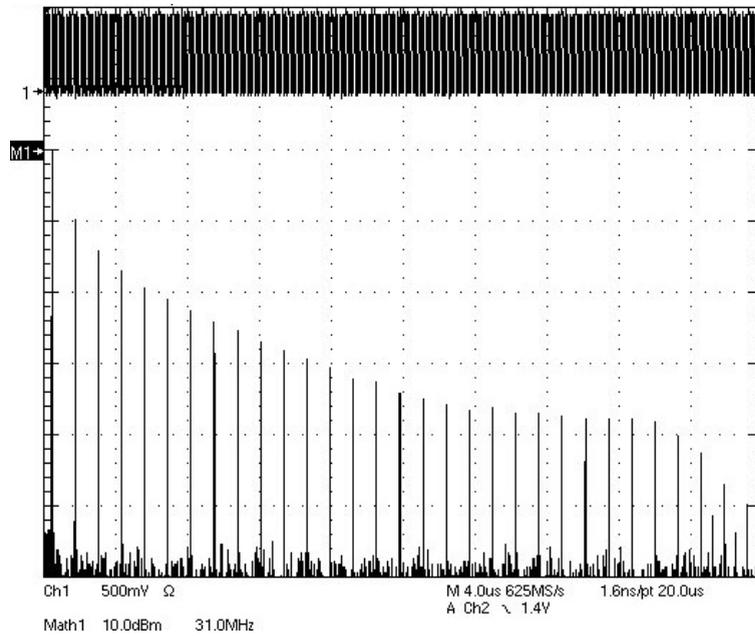


Рис. 4. Спектр радиочастотного заполнения при непрерывной генерации, полученный осциллографом

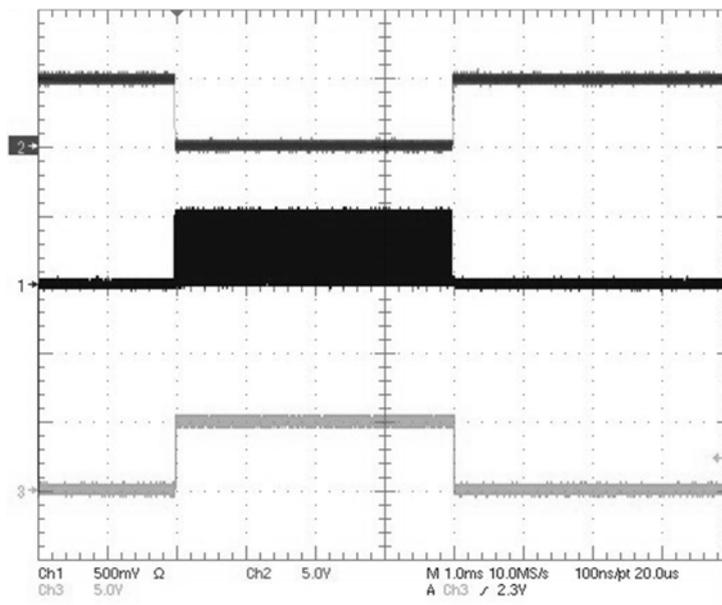


Рис. 5. Генерация импульсного сигнала при $\tau_{\text{имп}} = t_{\text{св}}$

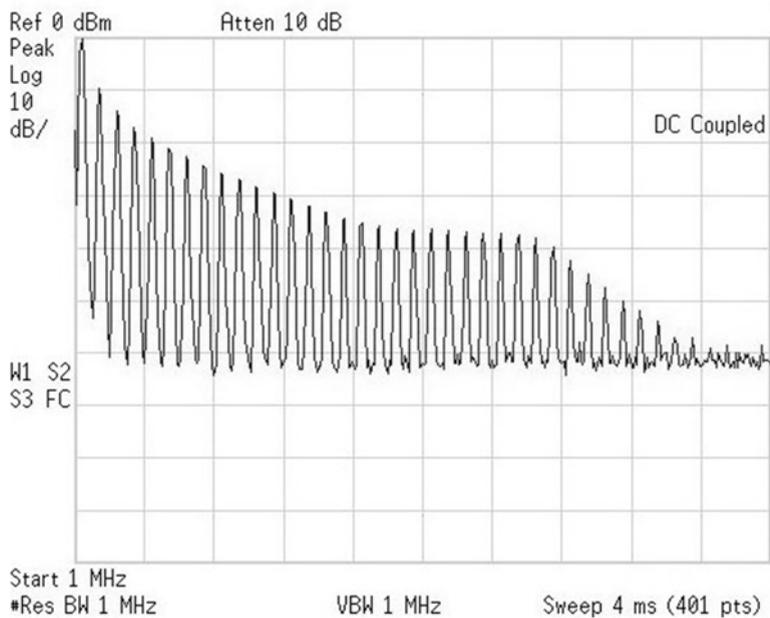


Рис. 6. Спектр радиочастотного заполнения при $\tau_{\text{имп}} = t_{\text{св}}$

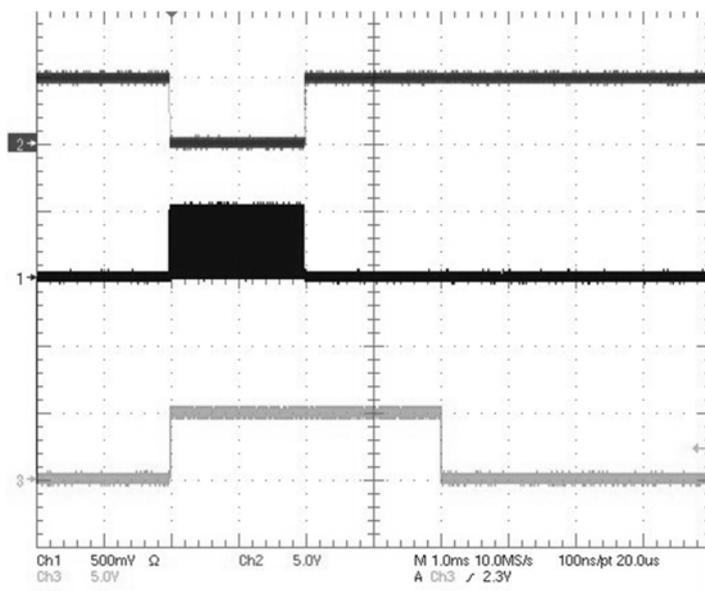


Рис. 7. Генерация импульсного сигнал при $\tau_{\text{имп}} < t_{\text{св}}$

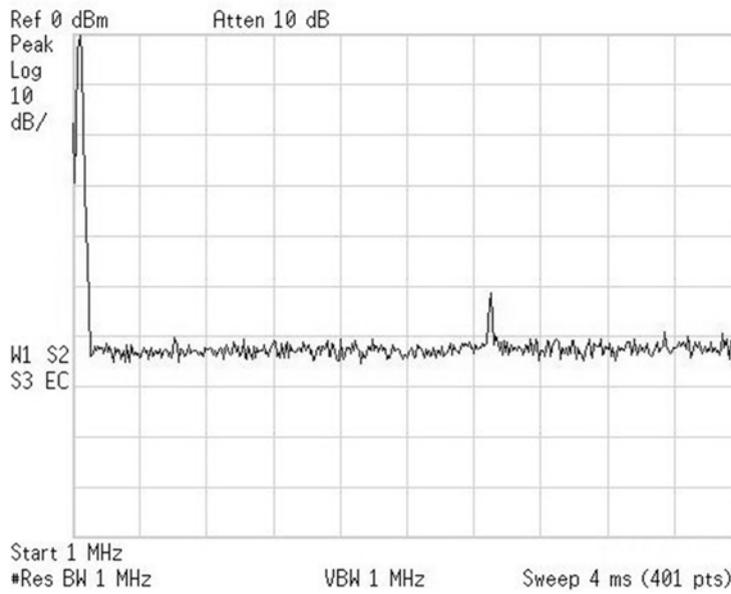


Рис. 8. Спектр радиочастотного заполнения при $\tau_{имп} = 100 \text{ мкс} < t_{св}$

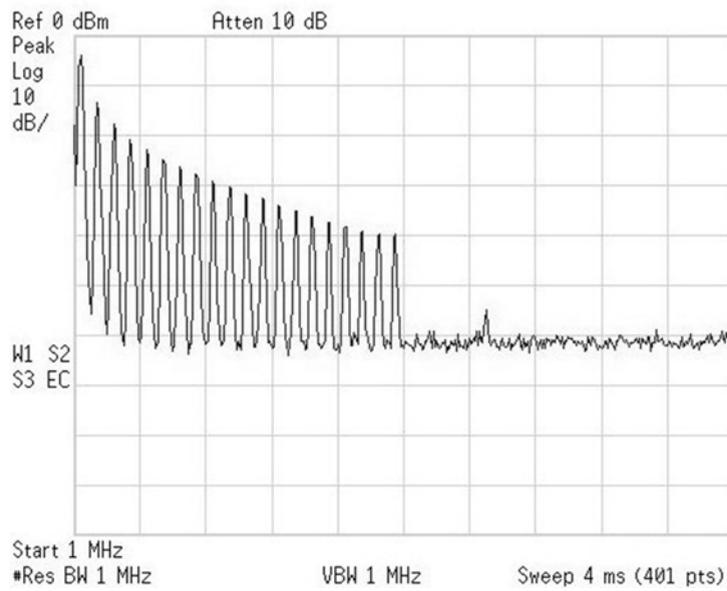


Рис. 9. Спектр радиочастотного заполнения при $\tau_{имп} = 2 \text{ мс} < t_{св}$

Рассмотрим случай, когда за время свипирования на вход АС поступает несколько радиоимпульсов. На рис. 10 длительность импульсов на осциллограмме для наглядности увеличена до 10 мс. На рис. 11 представлена спектрограмма сигнала, когда $t_{CB} = 160$ мс, т. е. более чем в 3 раза превышает период следования радиоимпульсов $T_{имп} = 50$ мс. Как видно из рис. 11, в таком режиме наблюдается эффект «нарезания» спектра: частотные составляющие отображаются в спектре лишь во время присутствия сигнала на входе АС.

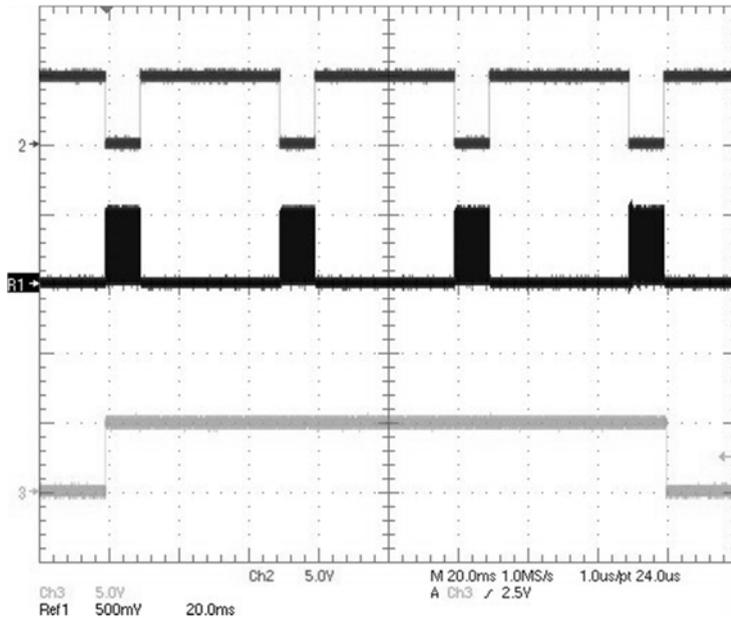


Рис. 10. Генерация импульсного сигнал при $t_{CB} > 3T_{имп}$

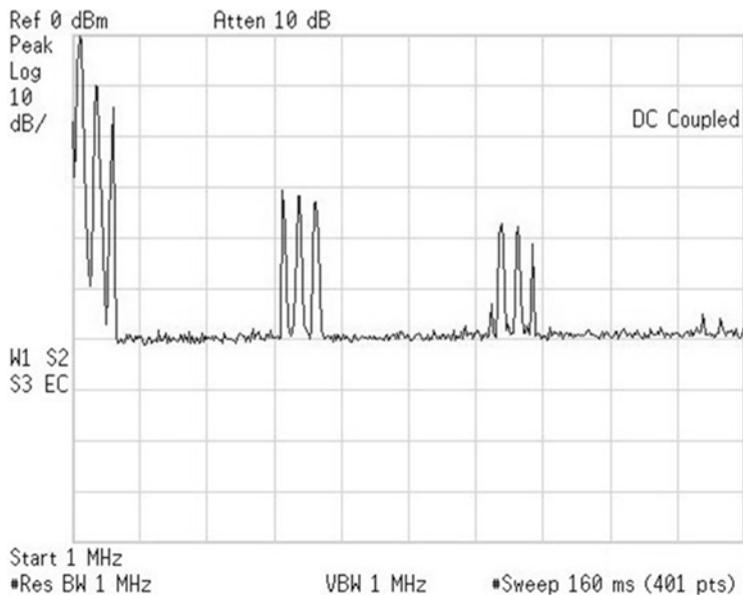


Рис. 11. Спектр радиочастотного заполнения при $t_{CB} > 3T_{имп}$

На основе полученных результатов можно сформулировать условие применения метода измерения спектра высокочастотного заполнения радиоимпульсов с помощью АС: длительность радиоимпульса $\tau_{\text{ИИП}}$ должна быть больше времени свипирования $t_{\text{СВ}}$ по частоте на величину, учитывающую длительность переднего и заднего фронтов радиоимпульса. При выполнении этого условия спектр наблюдается во всей заданной полосе обзора АС. Данное условие налагает определенное ограничение на минимальную длительность импульсов ИИП, обусловленное наличием минимума времени свипирования по частоте АС.

Выполненные исследования позволяют измерить спектральные характеристики прибора СВЧ – резонансного СВЧ-генератора О-типа дециметрового диапазона, который при заданных уровне согласования с выходной нагрузкой и амплитуде рабочего напряжения генерирует сигналы с различной спектральной плотностью. Это позволяет использовать СВЧ-генератор О-типа как объект исследования для оценки результатов применения метода измерения спектра высокочастотного заполнения радиоимпульсов.

Схема подключения измерительного оборудования представлена на рис. 12. Спектральные параметры выходного сигнала СВЧ-генератора измеряются АС, информация о выходном токе и выходном напряжении поступает на осциллограф, электропитание в импульсном и непрерывном режимах катода и катодно-подогревательного узла электронной пушки обеспечивает ИИП.

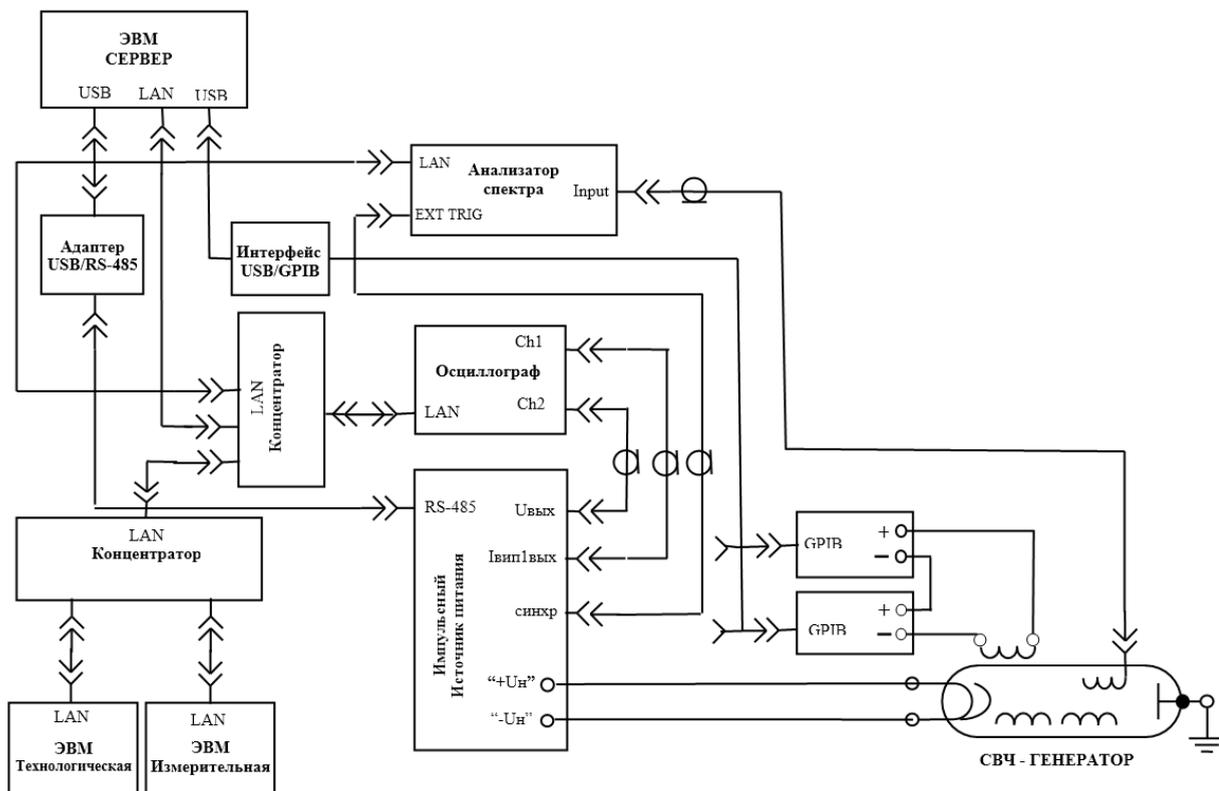


Рис. 12. Схема подключения измерительного оборудования для исследования спектральных характеристик СВЧ-генератора

На рис. 13 представлены результаты измерения спектра сигнала на выходе СВЧ-генератора в режиме непрерывного и импульсного (скважность 100) электропитания катода пушки. Согласно рис. 13 спектр выходного сигнала в условиях импульсного режима электропитания СВЧ-генератора полностью аналогичен спектру при непрерывном режиме.

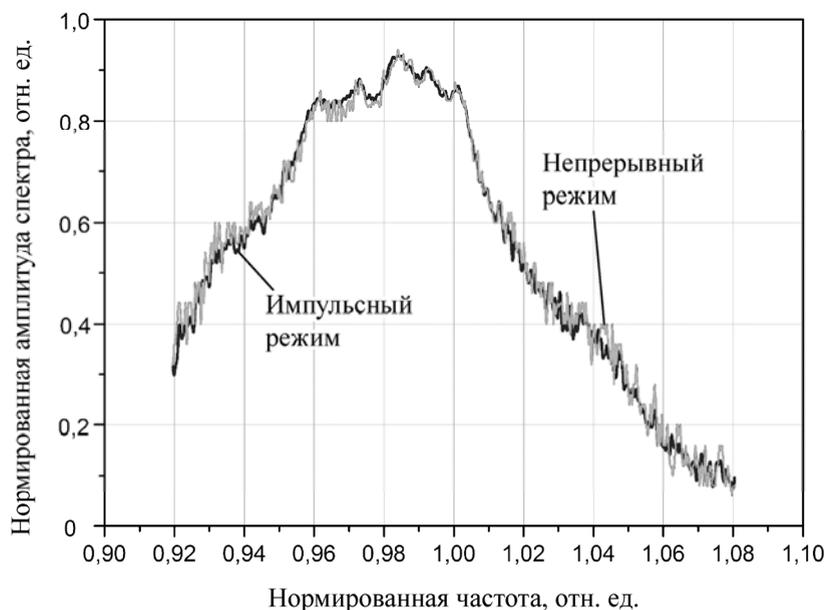


Рис. 13. Спектр выходного сигнала в режиме непрерывного и импульсного электропитания СВЧ-генератора

Выводы

Таким образом, для получения достоверного спектра выходного сигнала с помощью АС время анализа должно быть меньше длительности радиоимпульса. В этом случае спектр выходного сигнала аналогичен спектру непрерывного сигнала в условиях импульсного электропитания приборов СВЧ. Использование импульсного режима позволяет снизить мощность, рассеиваемую в приборе СВЧ, в десять раз и более, исследовать предельные режимы без его разрушения, экономить электроэнергию и теплоноситель.

Список литературы

1. Ошкин И. В., Троцюк К. В. Общая схема разработки электронно-оптических систем в приборах СВЧ // Сб. докл. Восьмой науч.-техн. конф. «Молодежь в науке». – Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2009. С. 492–497.
2. Oshkin I. V., Profe V. B., Trotsyuk K. V. Study of the external loading influence on BWT-generator operation modes // 24th Int. Crimean Conf. «Microwave & Telecommunication Technology» (CriMiCo-2014). Sevastopol, Russia, 2014. P. 165–166.
3. Ошкин И. В., Профе В. Б., Троцюк К. В. Режимы генерации колебаний резонансного ЛОВ-генератора // Сб. докл. Четырнадцатой науч.-техн. конф. «Молодежь в науке». – Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2015. С. 242–247.

Research of Continuous Broadband Signals in a Mode of Pulse Power Supplies of Devices of Microwave Frequency

I. V. Oshkin, V. B. Profe, K. V. Trotsyuk, A. I. Guzov, E. A. Kopelovich

The method for research of spectral characteristics of continuous broadband signals of microwave devices in a pulse mode from high-voltage power supplies is offered. Within the bounds of the offered method results of measurement of spectral characteristics of the resonant microwave generator of O-type are presented.