

# ИССЛЕДОВАНИЕ НЕПРЕРЫВНЫХ ШИРОКОПОЛОСНЫХ СИГНАЛОВ В РЕЖИМЕ ИМПУЛЬСНОГО ПИТАНИЯ ПРИБОРОВ СВЧ

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

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», г. Саров Нижегородской обл.

## Введение

Экспериментальные работы по исследованию спектральных характеристик непрерывных сигналов приборов СВЧ повышенной мощности связаны с большими тепловыми нагрузками на основные функциональные узлы [1]. При проведении предварительной настройки, выполнении входного контроля и при исследовании в предельных режимах требуются значительные времена работы, что в некоторых практических случаях может привести к дефекту или разрушению функциональных узлов прибора. Существенно снизить тепловые нагрузки возможно в импульсном режиме работы прибора. В отличие от непрерывного режима питания, импульсный режим позволяет проводить измерения спектральных характеристик 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]. Исследования спектральных характеристик прибора СВЧ проводятся с помощью осциллографа с встроенным фильтром быстрого преобразования Фурье (БПФ) или с помощью анализатора спектра (АС). Выбор измерительного оборудования зависит от частотного диапазона, от требований к разрешающей способности спектрального анализа и его стоимости. Кроме того, при исследовании сложных сигналов, в частности, при анализе сложно модулированных 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 от 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 для проведения исследований (см. 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 широкополосного высокочастотного заполнения используется сигнал типа «мандра» с частотой следования 5 МГц, спектр которого представляет собой только нечетные гармоники, убывающие по амплитуде пропорционально номеру гармоники. Сформированный сигнал последовательности радиоимпульсов с выхода ГСПФ поступает на вход АС и на вход осциллографа, позволяя проводить сравнительную оценку спектров выходного сигнала в зависимости от параметров импульсной последовательности ГСПФ.

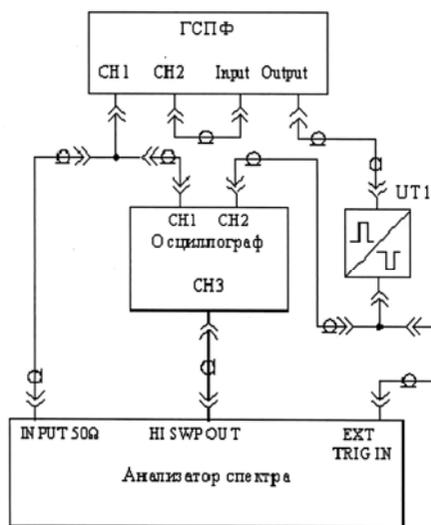


Рис. 1. Схема для проведения исследований

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  $t_{\text{свип}}$  АС.

Время свипирования по частоте  $t_{\text{свип}}$  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

составляет  $t_{\text{свип}} = 2\text{мс}$  для измерения 201 точки спектрограммы. Однако в этом случае, 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  $t_{\text{свип}} = 4\text{мс}$  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 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  $t_{\text{свип}} = 4\text{мс}$ . На осциллографе для исключения спектральных составляющих, обусловленных переходными процессами на переднем фронте, устанавливается величина задержки  $t_3$ , превышающая длительность переднего фронта  $t_{\text{пф}}$  радиоимпульса для ИИП не менее 20 мкс.

В работе рассматриваются три случая с возможными соотношениями параметров импульсной последовательности радиоимпульсов ГСПФ и времени свипирования по частоте  $t_{\text{свип}}$  АС:

- $\tau_{\text{имп}} = t_{\text{свип}}$ ;
- $\tau_{\text{имп}} < t_{\text{свип}}$ ;
- $\tau_{\text{имп}} > 3T_{\text{имп}}$ ,

где  $T_{\text{имп}} = 50\text{мс}$  – период последовательности радиоимпульсов.

### Результаты исследований

На рис. 2 представлена 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 представлена спектрограмма, полученная с помощью осциллографа с использованием встроенной опцией БПФ времен-

ной реализации фрагмента радиочастотной составляющей сигнала.

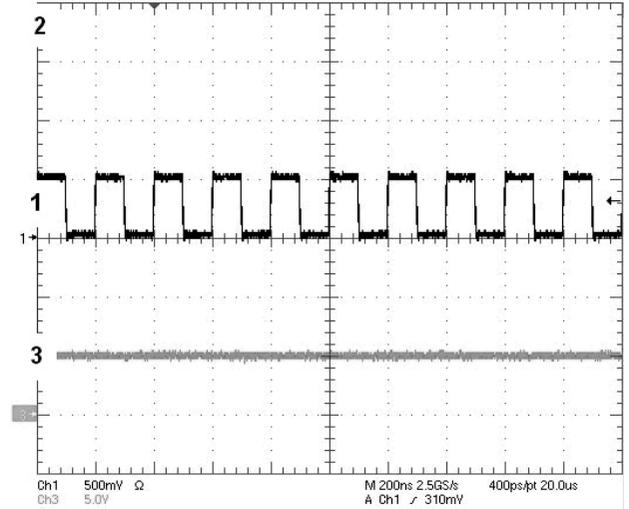


Рис. 2. Непрерывная генерация сигнала: 1 – сигнал на выходе ГСПФ, 2 – сигнал внешней синхронизации АС, 3 – сигнал выполнения цикла развертки АС

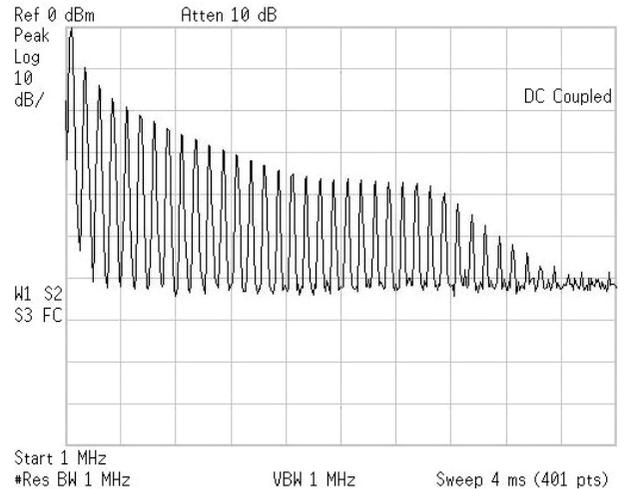


Рис. 3. Спектр радиочастотного заполнения при непрерывной генерации, полученный анализатором спектра

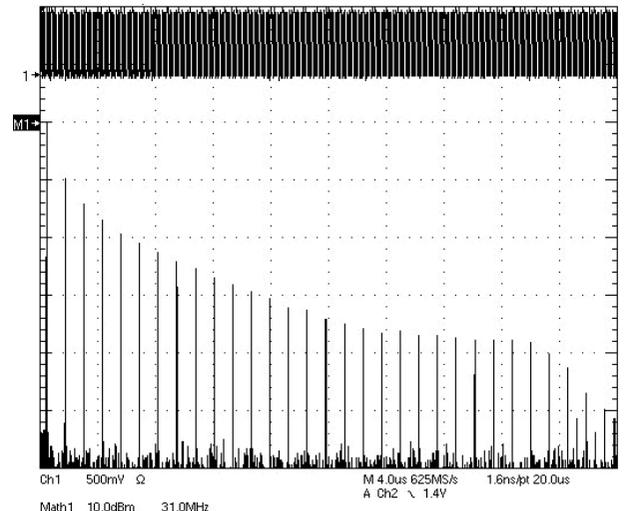


Рис. 4. Спектр радиочастотного заполнения при непрерывной генерации, полученный осциллографом

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

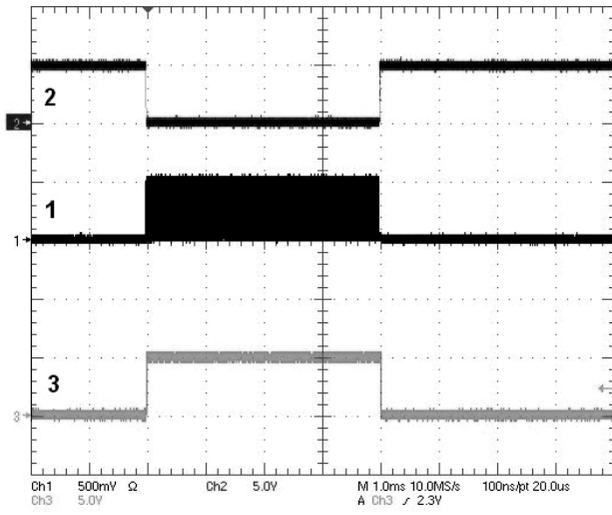


Рис. 5. Генерация импульсного сигнала при  $\tau_{\text{имп}} = t_{\text{свип}}$ : 1 – сигнал на выходе ГСПФ, 2 – сигнал внешней синхронизации АС, 3 – сигнал выполнения цикла развертки АС

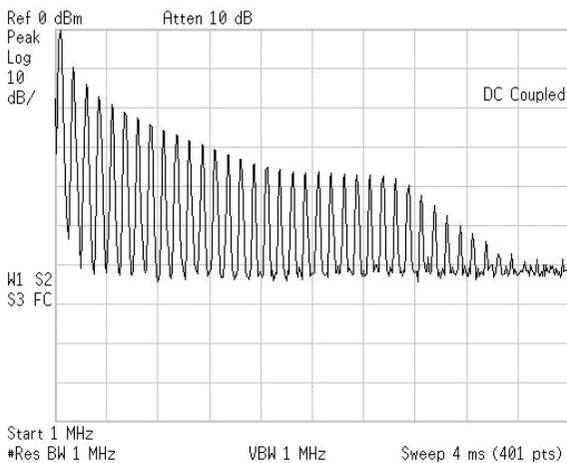


Рис. 6. Спектр радиочастотного заполнения при  $\tau_{\text{имп}} = t_{\text{свип}}$

На рис. 7 представлена осциллограмма, когда длительность радиоимпульса на входе АС меньше времени свипирования АС, то есть  $\tau_{\text{имп}} < t_{\text{свип}}$ . Если

длительность радиоимпульса  $\tau_{\text{имп}}$  соответствует наименьшей длительности импульса блока коммутатора ИИП  $\tau_{\text{имп}} = 100$  мкс, то на спектре радиочастотного заполнения достоверно виден лишь короткий начальный участок действительного спектра (рис. 8). Если длительность радиоимпульса на входе АС  $\tau_{\text{имп}} = 2$  мс (в два раза меньше времени свипирования  $t_{\text{свип}} = 4$  мс), то в этом случае наблюдаемая спектрограмма (рис. 9) соответствует спектрограмме в непрерывном режиме лишь до половины развертки АС, когда с момента ее запуска прошло 2 мс, то есть время равное длительности радиоимпульса  $\tau_{\text{имп}}$ . Однако спектрограммы, полученные с помощью осциллографа для случаев  $\tau_{\text{имп}} = 100$  мкс и  $\tau_{\text{имп}} = 2$  мс, не имеют подобных искажений и полностью соответствует 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.

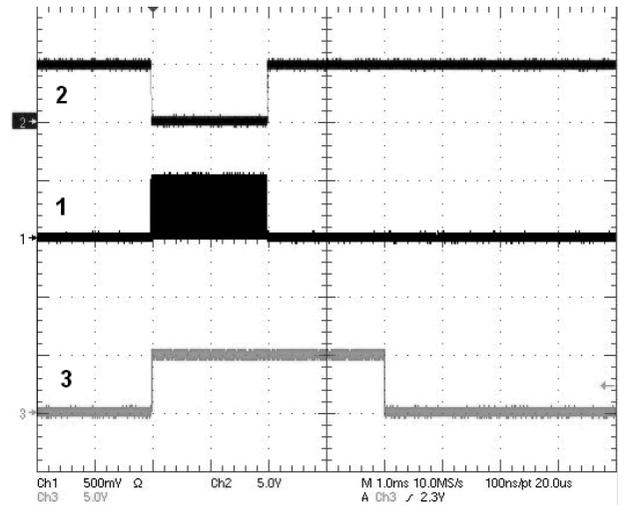


Рис. 7. Генерация импульсного сигнала при  $\tau_{\text{имп}} < t_{\text{свип}}$ : 1 – сигнал на выходе ГСПФ, 2 – сигнал внешней синхронизации АС, 3 – сигнал выполнения цикла развертки АС

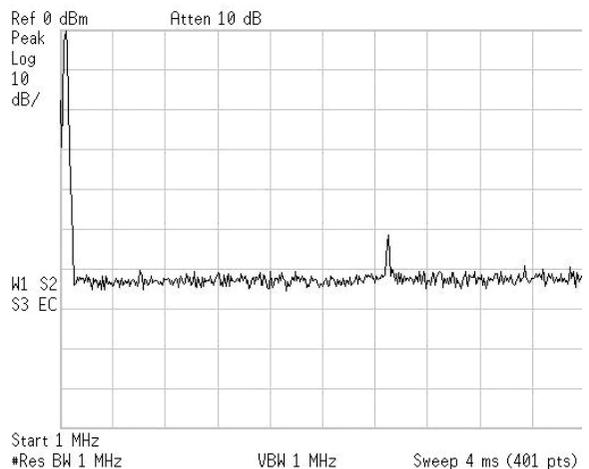


Рис. 8. Спектр радиочастотного заполнения при  $\tau_{\text{имп}} = 100 \text{ мкс} < t_{\text{свип}}$

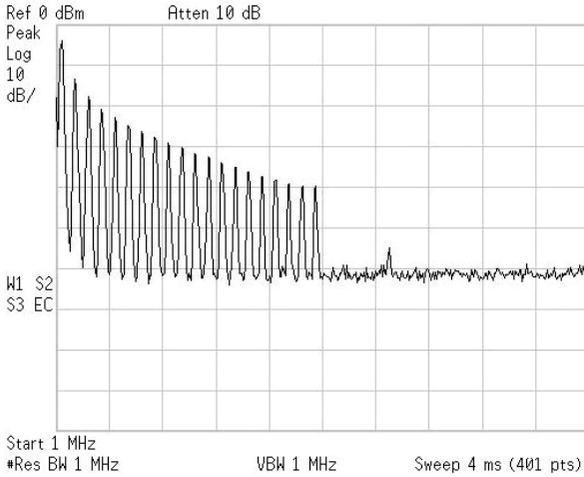


Рис. 9. Спектр радиочастотного заполнения при  $\tau_{\text{имп}} = 2 \text{ мс} < t_{\text{свип}}$

Рассмотрим случай, когда за время свипирования на вход АС поступает несколько радиоимпульсов. На осциллограмме рис. 10 длительность импульсов для наглядности эффекта увеличена до 10 мс. На рис. 11 представлена спектрограмма сигнала, когда время свипирования  $t_{\text{свип}} = 160 \text{ мс}$  имеет более чем трехкратное превышение периода следования радиоимпульсов  $T_{\text{имп}} = 50 \text{ мс}$ . 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.

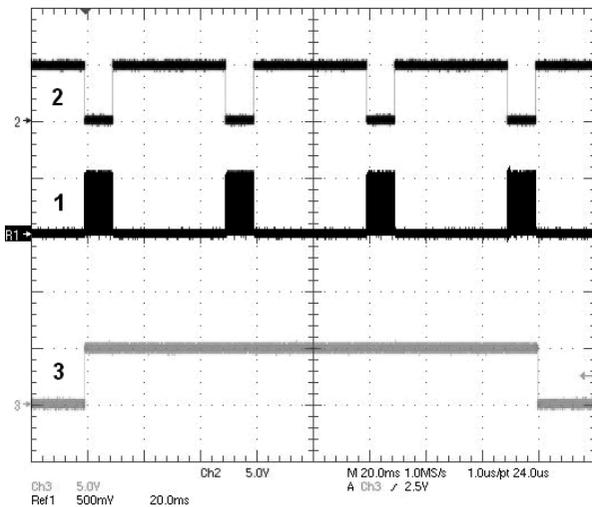


Рис. 10. Генерация импульсного сигнала при  $t_{\text{свип}} > 3T_{\text{имп}}$ : 1 – сигнал на выходе ГСПФ, 2 – сигнал внешней синхронизации АС, 3 – сигнал выполнения цикла развертки АС

На основе полученных результатов исследований можно сформулировать условие применения метода измерения спектра высокочастотного заполнения радиоимпульсов с помощью АС. Для наблюдения спектра высокочастотного заполнения периодической по-

следовательности радиоимпульсов с помощью АС

длительность радиоимпульса  $\tau_{\text{имп}}$  должна быть больше времени свипирования по частоте  $t_{\text{свип}}$  на величину, учитывающую длительности переднего и заднего фронтов радиоимпульса. При этом условии спектр будет наблюдаться во всей заданной полосе обзора АС. Данное условие вносит определенное ограничение на длительность импульсов ИИП со стороны их минимальной величины обусловленное имеющимся минимумом времени свипирования по частоте АС.

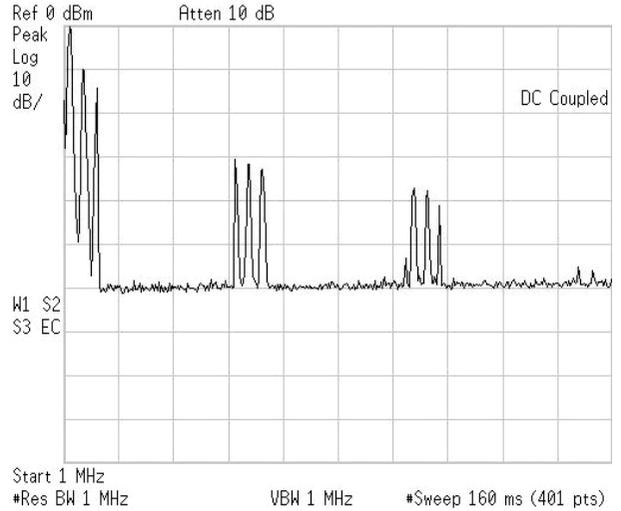


Рис. 11. Спектр радиочастотного заполнения при  $t_{\text{свип}} > 3T_{\text{имп}}$

Полученные результаты исследования позволяют провести измерения спектральных характеристик прибора СВЧ, в качестве которого выберем резонансный СВЧ-генератор О – типа дециметрового диапазона [4]. Резонансный СВЧ-генератор О – типа при заданном уровне согласования с выходной нагрузкой и амплитуде рабочего напряжения генерирует сигналы с различной формой спектральной плотности, что позволяет использовать его как объект исследования для оценки применения метода измерения спектра высокочастотного заполнения радиоимпульса.

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 обеспечивается ИИП.

На рис. 13 представлены результаты измерения спектра сигнала на выходе СВЧ-генератора в режиме непрерывного и импульсного ( $T/\tau_{\text{имп}} = 100$ ) электропитания катода пушки. Согласно рис. 13, спектр выходного сигнала в условиях импульсного режима электропитания СВЧ-генератора полностью эквивалентен спектру при непрерывном режиме.

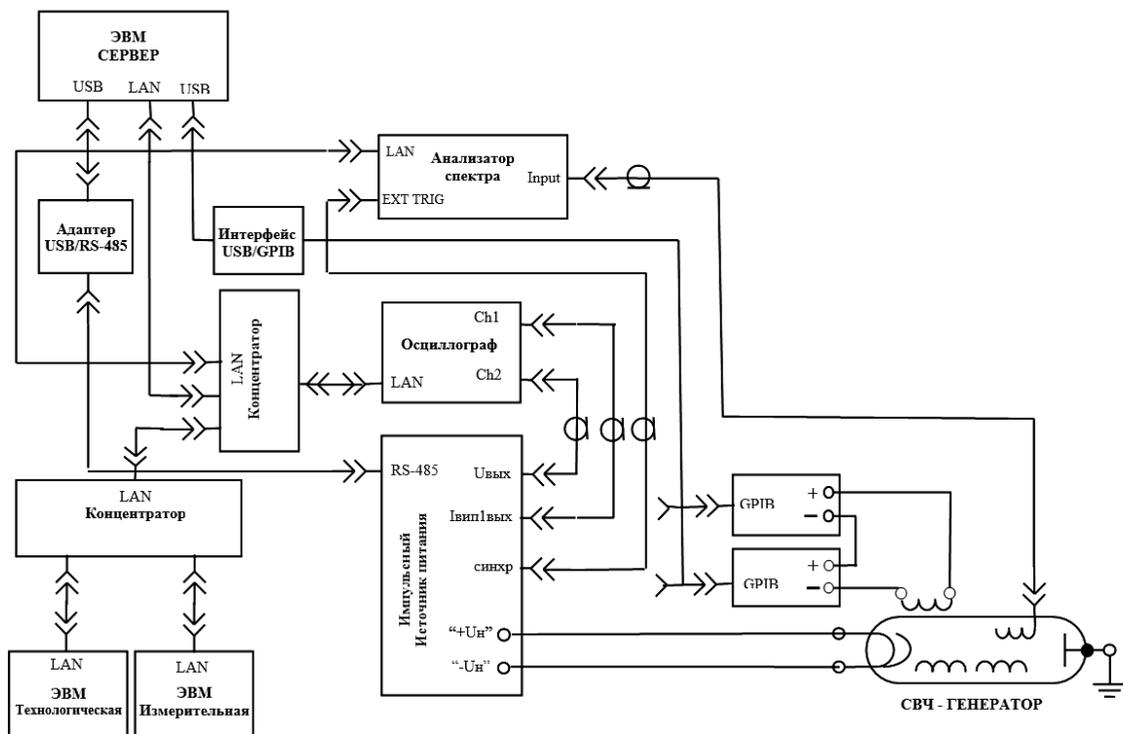


Рис. 12. Схема подключения измерительного оборудования для исследования спектральных характеристик СВЧ-генератора

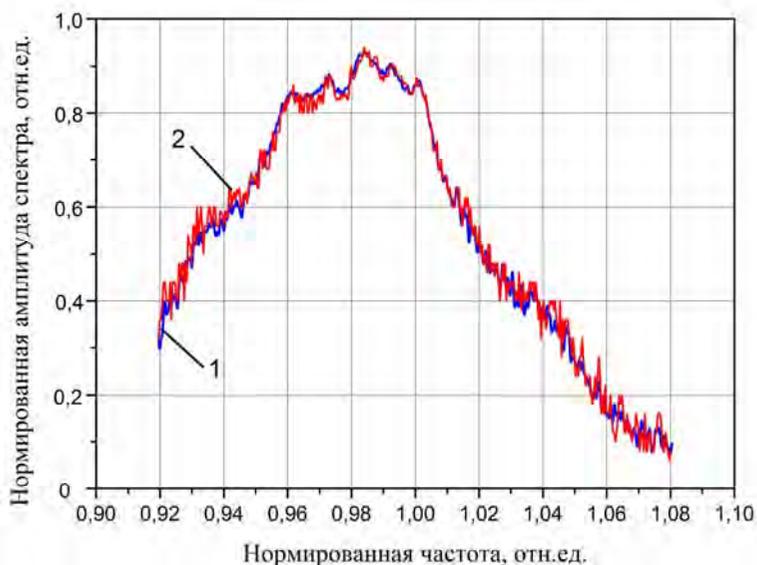


Рис. 13. Спектр выходного сигнала в режиме непрерывного и импульсного электропитания СВЧ-генератора: 1 – импульсный режим, 2 – непрерывный режим

### Выводы

Таким образом, предложенный метод измерения спектра высокочастотного заполнения радиоимпульсов, позволяет проводить исследования непрерывных широкополосных сигналов в режиме импульсного электропитания приборов СВЧ при значительно меньших тепловых нагрузках на основные функциональные узлы. Полученные экспериментальные ре-

зультаты показывают, что для получения достоверного спектра выходного сигнала с помощью АС время анализа должно быть меньше длительности радиоимпульса. В этом случае получается спектр полностью эквивалентный спектру непрерывного сигнала в условиях импульсного электропитания приборов СВЧ. Использование импульсного режима позволяет снизить мощность, рассеиваемую в приборе СВЧ, в десять и более раз, проводить исследования пре-

дельных режимов без его разрушения, экономить электроэнергию и теплоноситель.

### Литература

1. Ошкин И. В., Троцюк К. В. Общая схема разработки электронно-оптических систем в приборах СВЧ. Сборник докладов Восьмой научно-технической конференции «Молодежь в науке». – Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2009. Вып. 8. С. 492–497.

2. Oshkin I. V., Profe V. B., Trotsyuk K. V. Study of the external loading influence on BWT-generator operation modes. 2014 24<sup>th</sup> Int. Crimean Conf. «Microwave & Telecommunication Technology» (CriMiCo-2014). – Sevastopol, P. 165–166.

3. Ошкин И. В., Профе В. Б., Троцюк К. В. Экспериментальное исследование режимов генерации колебаний резонансной лампы обратной волны. Сборник докладов 22-й международной научно-технической конференции «Радиолокация, навигация, связь» (RLNC-2016). – Воронеж: НПФ «САК-ВОЕЕ» ООО, 2016. Т. 2. С. 1342–1349.

4. Ошкин И. В., Профе В. Б., Троцюк К. В. Режимы генерации колебаний резонансного ЛОВ-генератора. Сб. докл. Четырнадцатой научно-технической конф. «Молодежь в науке». – Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2015. Вып. 14. С. 242–247.