

УДК 621.385.632 621.373.5

М. С. Сорокин

Харьковский национальный университет сельского хозяйства (НТУСХ)

им. П. В. Василенко, г. Харьков

А.В. Архипов, В.Т. Плаксий

Институт радиопизики и электроники им. А.Я. Усикова НАН Украины, г. Харьков,

## ТЕОРИТИЧЕСКИЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ КАЧЕСТВА СПЕКТРА ИМПУЛЬСНЫХ ГЕНЕРАТОРОВ КВЧ ДИАПАЗОНА

*Разработан метод и программа расчета спектров с линейным изменением фазы на фронте и спаде радиоимпульса. Приведены результаты аналитического расчёта и экспериментальных исследований огибающей спектра радиоимпульса для уровней составляющих -40 дБ относительно уровня несущей.*

**Ключевые слова:** спектр, фазовые искажения, радиоимпульс, длительность импульса, модуляция фазы, фронт и спад импульса.

*Розроблено метод і програма розрахунку спектрів з лінійним зміною фази на фронті і спаді радіоімпульсу. Наведено результати аналітичного розрахунку і експериментальних досліджень обвідної спектра радіоімпульсу для рівнів складових -40 дБ щодо рівня несучої.*

**Ключові слова:** спектр, фазові спотворення, радіоімпульс, тривалість імпульсу, модуляція фази, фронт і спад імпульсу.

### Постановка проблемы

В настоящее время достигнуты определённые успехи в создании импульсных твердотельных генераторов мм диапазона волн, которые находят применение в современных некогерентных радиолокаторах, где смещение частоты в пределах импульса полезно для сглаживания помех от цели и улучшения отношения сигнал/шум [1,2]. Основными параметрами при работе СВЧ-приборов в импульсном режиме являются уровень выходной мощности и качество спектра. Среди импульсных твердотельных генераторов мм диапазона наиболее мощными являются генераторы на основе кремниевых двухпролётных ЛПД, работающие в режиме коротких импульсов (длительностью порядка 50-200 нс) и выходной мощностью более 10 Вт в диапазоне 30-40 ГГц [3].

#### Анализ предшествующих исследований

Анализ работ, посвящённых расчёту спектров выходного сигнала в режиме коротких импульсов [4-5] показал, что амплитудные и фазовые искажения вызваны различными внешними и внутренними факторами. При изменении внешних параметров (напряжения источника питания, параметров СВЧ нагрузки и колебательной системы, параметров внешней среды и т.п.), а также при изменении теплофизических параметров диода (снижение удельного отрицательного сопротивления ЛПД при больших плотностях тока) возникают искажения спектра выходного сигнала. Искажения спектра сигнала в зависимости от внешних параметров принято называть модуляционными искажениями.

#### Формирование целей статьи

Целью данной работы является, во-первых, разработка метода и программы расчёта спектров радиоимпульсов при линейном изменении фазы на фронте и спаде импульса и, во-вторых, экспериментально исследовать спектры импульсного генератора на лавинно – пролётном диоде 8-мм диапазона волн.

#### Основная часть

Метод и результаты расчёта спектров радиоимпульса.

Рассмотрим огибающую трапецеидального импульса, которая задается функцией следующего вида

$$F(t) = U \begin{cases} a_1 t, & 0 \leq t \leq \tau_{\Phi}, \\ 1, & \tau_{\Phi} \leq t \leq \tau + \tau_{\Phi}, \\ a_2 t + b, & \tau + \tau_{\Phi} \leq t \leq \tau + \tau_{\Phi} + \tau_{cn}, \end{cases} \quad (1)$$

где  $\tau$  — длительность импульса,  $\tau_{\Phi}$  и  $\tau_{cn}$  соответственно длительность фронта и спада импульса, а коэффициенты  $a_1, a_2, b$  определяются по формулам

$$a_1 = \tau_{\Phi}^{-1}, \quad a_2 = -\tau_{cn}^{-1}, \quad b = 1 + \frac{\tau + \tau_{\Phi}}{\tau_{cn}}.$$

Не ограничивая общности, предполагается, что максимальное значение, которое принимает импульс равно  $U < 1$ , т. е. рассматривается относительное изменение импульса.

Пусть на фронте импульса наблюдается линейное изменение фазы, которое задается функцией  $\varphi(t)$

$$\varphi(t) = \begin{cases} \frac{\varphi_M}{\tau_{\Phi}} t, & 0 \leq t \leq \tau_{\Phi}, \\ 0, & t \geq \tau_{\Phi}, \end{cases} \quad (2)$$

где  $\tau_{\Phi}$  — длительность фронта импульса;

$\varphi_M$  — максимальное значение изменения амплитуды фазы.

Вычислим спектр огибающей трапецеидального радиоимпульса с линейным фазовым искажением на фронте (см. (1), (2)). В соответствии с определением спектра требуется вычислить спектр  $S(\omega)$  по следующей формуле

$$S(\omega) = \int_0^{\tau + \tau_{\Phi} + \tau_{cn}} F(t) e^{i(\omega t + \varphi(t))} dt, \quad (3)$$

где функции  $F(t)$  и  $\varphi(t)$  определяются по формулам (1) и (2).

Согласно (1) и (3) имеем

$$S(\omega) = a_1 \int_0^{\tau_{\Phi}} t e^{i\left(\omega t + \frac{\varphi_M t}{\tau_{\Phi}}\right)} dt + \int_{\tau_{\Phi}}^{\tau + \tau_{\Phi}} e^{i\omega t} dt + \int_{\tau + \tau_{\Phi}}^{\tau + \tau_{\Phi} + \tau_{cn}} (a_2 t + b) e^{i\omega t} dt. \quad (4)$$

Вычислив интеграл в (4), имеем

$$a_1 \int_0^{\tau_{\Phi}} t e^{i\left(\omega t + \frac{\varphi_M t}{\tau_{\Phi}}\right)} dt = \frac{\tau_{\Phi}}{(\omega \tau_{\Phi} + \varphi_M)} \left( -i e^{i(\tau_{\Phi} \omega + \varphi_M)} + \frac{e^{i(\tau_{\Phi} \omega + \varphi_M)}}{\omega \tau_{\Phi} + \varphi_M} \right), \quad (5)$$

далее

$$\int_{\tau_{\Phi}}^{\tau + \tau_{\Phi}} e^{i\omega t} dt = \frac{e^{j\omega(\tau + \tau_{\Phi})} - e^{j\omega\tau_{\Phi}}}{i\omega}, \quad (6)$$

$$\int_{\tau+\tau_{\Phi}}^{\tau+\tau_{\Phi}+\tau_{cn}} (a_2 t + b) e^{i\omega t} dt = \frac{e^{i\omega(\tau+\tau_{\Phi})}}{\omega} \left[ ib(1 - e^{i\omega\tau_{cn}}) + a_2(\tau + \tau_{\Phi} - (\tau + \tau_{\Phi} + \tau_{cn})e^{i\omega\tau_{cn}} + \frac{e^{i\omega\tau_{cn}} - 1}{\omega}) \right]. \quad (7)$$

Подставляя (5)-(7) в (4) окончательно получаем

$$S(\omega) = \frac{\tau_{\Phi}}{(\omega\tau_{\Phi} + \varphi_M)} \left[ -ie^{i(\tau_{\Phi}\omega + \varphi_M)} + \frac{e^{i(\tau_{\Phi}\omega + \varphi_M)} - 1}{\omega\tau_{\Phi} + \varphi_M} \right] + i \frac{e^{i\omega\tau_{\Phi}} - e^{i\omega(\tau+\tau_{\Phi})}}{\omega} + \frac{e^{i\omega(\tau+\tau_{\Phi})}}{\omega} \times \left[ ib(1 - e^{i\omega\tau_{cn}}) + a_2 \left( \tau + \tau_{\Phi} - (\tau + \tau_{\Phi} + \tau_{cn})e^{i\omega\tau_{cn}} + \frac{e^{i\omega\tau_{cn}} - 1}{\omega} \right) \right]. \quad (8)$$

Из (8) легко получить значение  $S(\omega)$  при  $\omega = 0$ .

$$S(0) = \frac{\tau_{\Phi}}{\varphi_M} \left( -ie^{i\varphi_M} + \frac{e^{i\varphi_M} - 1}{\varphi_M} \right) + \tau + \frac{\tau_{cn}}{2}. \quad (9)$$

Далее на основе, полученных формул для спектра (8), (9), проанализируем как изменяется спектр огибающей трапецеидального радиоимпульса при вариации параметра  $\varphi_M$  – максимальной амплитуды фазы. Для этого будем исследовать относительное изменение спектра, а именно следующую величину

$$A(f) = 10 \lg \left| \frac{S(2\pi f)}{S(0)} \right|, \quad (10)$$

как функцию частоты  $f = \frac{\omega}{2\pi}$ .

На рис. 1 приведены рассчитанные огибающие спектров трапецеидального радиоимпульса (на уровне -40 дБ) при отсутствии и наличии линейной модуляции фазы на фронте  $\varphi_M = 0^{\circ}$  (кривая 1),  $\varphi_M = 120^{\circ}$  (кривая 2) и  $\varphi_M = -120^{\circ}$  (кривая 3). Параметры радиоимпульса составили: длительность  $\tau_u = 100$  нс, длительность фронта 10 нс, длительность спада  $\tau_{cn} = 10$  нс.

Из рис. 1 видно, что при изменении модуляции фазы от  $\varphi_M = 120^{\circ}$  до  $\varphi_M = -120^{\circ}$ , спектр радиоимпульса заметно уширяется и уменьшается амплитуда импульса относительно амплитуды основного лепестка.

Приведенные результаты аналитического расчета спектров радиоимпульсов позволяют в случае линейной амплитудной и фазовой модуляции оценить влияние того или иного параметра СВЧ-прибора и его источников питания на количественные характеристики спектров выходного сигнала.

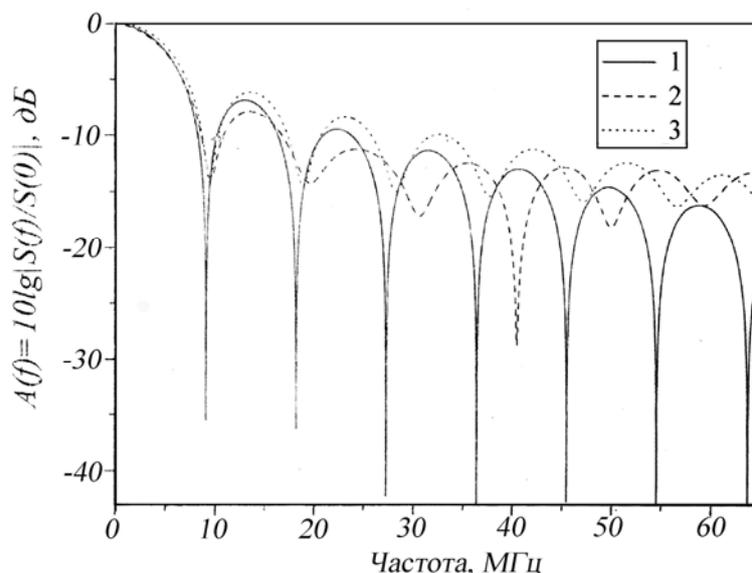


Рис. 1 Спектр радиоимпульса, рассчитанный без учета тепловых процессов

### Результаты эксперимента

Схема установки, на которой проводились измерения спектральных и энергетических характеристик импульсного ГЛПД приведена на рис. 2.

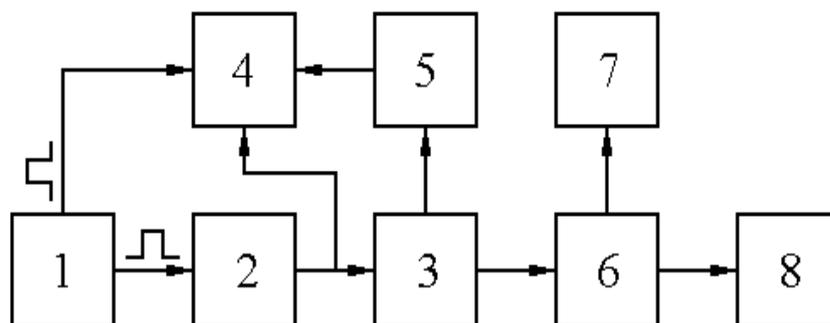


Рис 2. Блок схема измерительной установки:

1–генератор импульсов; 2–усилитель мощности тока; 3–исследуемый генератор;  
4–двухлучевой осциллограф; 5–детекторная секция; 6– ответвитель;  
7– анализатор спектра; 8–измеритель мощности.

Исследован ГЛПД волноводно-штыревой конструкции в диапазоне 35-37 ГГц выходной мощностью 15 Вт, импульсным напряжением  $U=40$  В и импульсным током  $I=15$  А. Питание генератора осуществлялось от генератора импульсов Г5-15 и усилителя мощности. Сигнал от генератора импульсов 1 и усилителя мощности 2 поступал на исследуемый импульсный генератор 3 на ЛПД, размещенном в волноводно-штыревой резонансной системы. Выходной сигнал через ответвитель 6 подавался на измеритель мощности 8 и на анализатор спектра С4-27. Форма импульсов тока наблюдалась на экране двухлучевого осциллографа С1-70.

Типичные формы импульсов тока огибающей СВЧ-импульса приведены на рис. 3

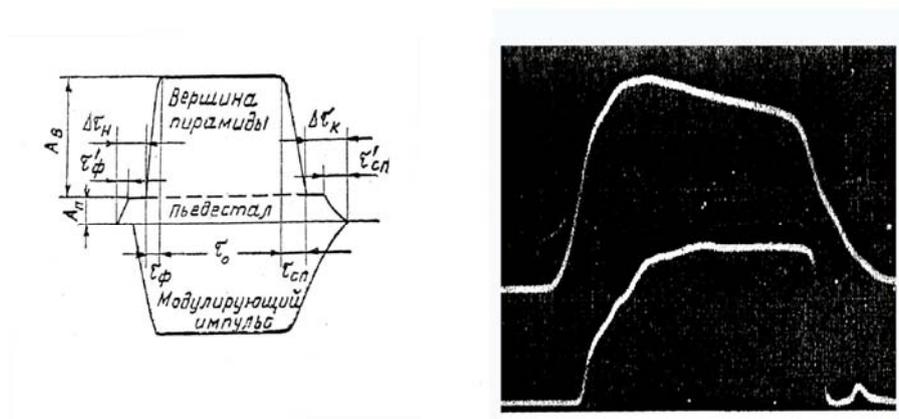


Рис. 3 Вид осциллограмм импульса тока и огибающей СВЧ - импульса

Фронт СВЧ-сигнала задержан относительно импульса модулирующего сигнала на величину порядка 0,1 мкс. Задержку можно объяснить конечным временем нарастания колебаний генератора из-за превышения характеристического тока ЛПД по отрицательному сопротивлению.

Форма спектра выходного сигнала наблюдалась на экране анализатора спектра С4-27 (рис. 4). Обнаружено, что в режиме коротких импульсов, т.е. при длительности импульса, меньшей времени тепловой релаксации диода ( $\tau_u < \tau_d$ ) и  $\tau_{\phi} = 10$  нс спектр сигнала имеет форму не отличающуюся от расчетной. Изменение модуляции фазы на фронте импульса и увеличение длительности импульса приводит к расширению спектра сигнала и уменьшению импульсной мощности (рис. 5).

На рис. 6 приведены спектры СВЧ-импульсов, полученные экспериментально при длительности импульса  $\tau_u = 100$  нс.

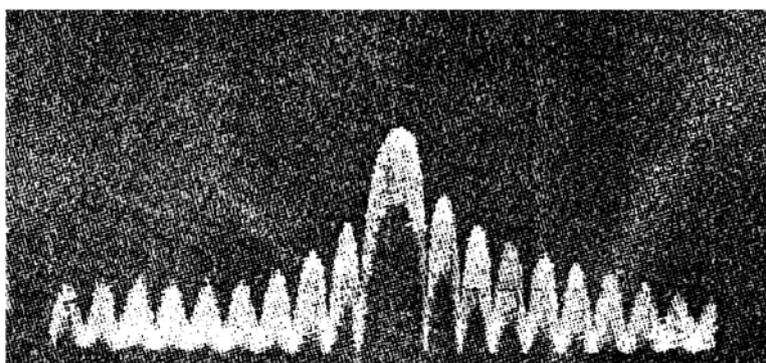


Рис. 4. Форма выходного сигнала радиоимпульса.

### Выводы

Разработан метод и программа расчета спектров радиоимпульсов с изменяющимися в течение времени параметрами. Предложенный в данной работе метод расчёта спектра радиоимпульса и результаты расчёта могут быть использованы для оценки влияния того или иного параметра СВЧ-прибора или его источника питания на количественные характеристики спектра. Экспериментально исследованы спектры импульсного генератора на ЛПД 8-мм диапазона волн.

### Список литературы

1. Л. В. Касаткин, В. Е. Чайка. Полупроводниковые устройства в миллиметровом диапазоне длин волн. Севастополь: Издательство Вебер, 2006. – 319 с.

2. Б. А. Коцержинский, В. П. Тараненко, В. А. Трапезон . Импульсные генераторы миллиметрового диапазона волн на лавинно-пролётных диодах. Известия вузов СССР – Радиоэлектроника, том 25, № 10, 1982, С. 56–64.

3. А. В. Воронин, А. В. Горбачёв, Л. В. Касаткин. Температурная нестабильность СВЧ-параметров импульсных автогенераторов. Электронная техника. Серия 1. Электроника СВЧ, 1990, вып. 5, С. 22–25.

4. Э. А. Гельвич, О. И. Обрезан, Г. С. Самохин. Изучение спектров выходных сигналов широкополосных усилителей. Электронная техника. Серия 1, 1979, № 1, С. 24–39.

5. С. В. Зубов, О. И. Обрезан. Исследование импульсного режима ГЛПД. Электронная техника, серия Электроника СВЧ, вып. 5, 1984, С. 41–43.

## RESEARCHING OUTPUT SPECTRUM SIGNALS OF IMPULSE IMPATT.

M. Sorokin, A. Arkhipov, V. Plaksiy

*The method and program for calculating the spectra with a linear phase change at the front and the decline of the radio pulse. The results of analytical calculations and experimental studies of radio-pulse envelope spectrum for the levels of components of -40 dB relative to the level of carrier.*

**Keywords:** *spectrum, phase distortions, radioimpul's, pulsewidth, modulation of phase, front and slump of impulse.*

*Поступила в редакцию 24.06 2010 г.*