

М.С. СОРОКИН, аспирант, ХНТУСХ им. П. Василенко
А.В. АРХИПОВ, с.н.с., Институт радиофизики и электроники им.
А.Я. Усикова НАН Украины
В.Т. ПЛАКСИЙ, с.н.с., Институт радиофизики и электроники им.
А.Я. Усикова НАН Украины

ИССЛЕДОВАНИЕ СПЕКТРА ВЫХОДНЫХ СИГНАЛОВ ИМПУЛЬСНОГО ГЛПД

Розроблено метод і програма розрахунку спектрів з лінійною зміною фази на фронті та спаді радіоімпульсу. Приведено результати розрахунку та експериментальних досліджень спектру радіоімпульсу для рівней складових – 40 дБ відносно рівня несучої частоти.

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

Постановка проблемы. В настоящее время достигнуты определенные 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 двухпролетных 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, посвященных расчету 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.

Целью работы является разработка метода и программы расчета спектров радиоимпульсов при линейном изменении фазы на фронте и спаде импульса и экспериментальное исследование спектров импульсного генератора на лавинно-пролетном диоде 8-мм диапазона волн.

Метод и результаты расчета спектров радиоимпульса.

Рассмотрим огибающую трапецеидального импульса, которая задается функцией следующего вида

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

где τ – длительность импульса, τ_ϕ и $\tau_{сп}$ соответственно длительность фронта и спада импульса, а коэффициенты a_1 , a_2 , b определяются по формулам:

$$a_1 = \tau_\phi^{-1}; \quad a_2 = \tau_{сп}^{-1}; \quad b = 1 + \frac{\tau + \tau_\phi}{\tau_{сп}}.$$

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 $\varphi(t)$

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

где τ_ϕ – длительность фронта импульса, φ_M – максимальное значение изменения амплитуды фазы.

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

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

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

Согласно (1) и (3) имеем

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

Вычислив интеграл в (4), имеем

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

Далее

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

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

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

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

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

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

Далее на основе, полученных формул для спектра (8), (9), проанализируем как изменяется спектр огибающей трапецидального ра-

диоимпульса при вариации параметра φ_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 $\tau_{\text{и}} = 100$ нс, длительность фронта 10 нс, длительность спада $\tau_{\text{сп}} = 10$ нс.

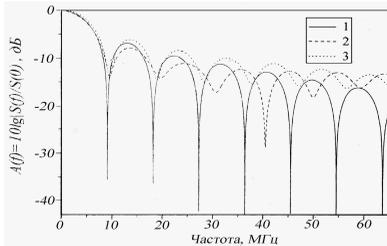


Рис. 1.

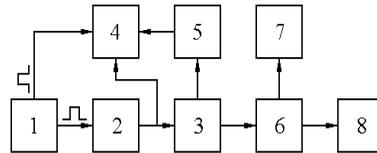


Рис. 2.

На 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.

Результаты эксперимента.

Схема установки, на которой проводились измерения спектральных и энергетических характеристик импульсного ГЛПД приведена на рис. 2. Основные элементы схемы: 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 системе. 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.

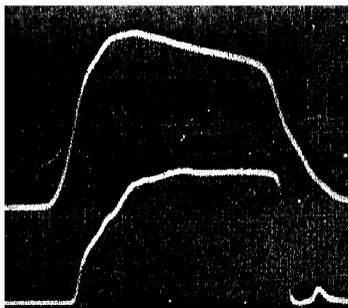
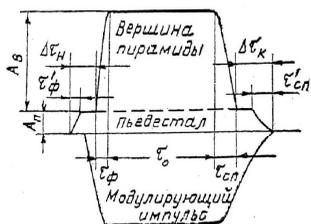


Рис. 3.

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 ($\tau_n < \tau_d$) и $\tau_\phi = 10$ нс спектр сигнала имеет форму не отличающуюся от расчетной. Изменение модуляции фазы на фронте импульса и увеличение длитель-

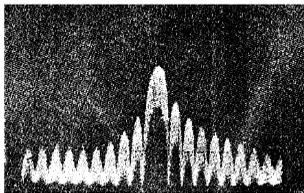


Рис. 4.

ности импульса приводит к расширению спектра сигнала и уменьшению импульсной мощности.

Выводы

1. Разработан метод и программа расчета спектров радиоимпульсов с изменяющимися в течение времени параметрами.

2. Приведены результаты расчетов и анализа спектров радиоимпульсов с учетом длительности импульса, линейного изменения фазы на фронте и спаде импульса.

3. Предложенный в данной работе метод расчета спектра радиоимпульса и результаты расчета могут быть использованы для оценки влияния того или иного параметра СВЧ-прибора или его источника питания на количественные характеристики спектра.

4. Экспериментально исследованы спектры импульсного генератора на ЛПД 8-мм диапазона волн.

Список литературы 1. *Касаткин Л.В., Чайка В.Е.* Полупроводниковые устройства в миллиметровом диапазоне длин волн. – Севастополь: Изд-во Вебер, 2006. – 319с. **2.** *Коцержинский Б.А., Тараненко В.П., Трапезон В.А.* Импульсные генераторы миллиметрового диапазона волн на лавинно-пролетных диодах // Известия вузов СССР. Радиоэлектроника. – Т. 25. – №10. – 1982. – С.56-64. **3.** *Воронин А.В., Горбачев А.В., Касаткин Л.В.* Температурная нестабильность СВЧ-параметров импульсных автогенераторов // Электронная техника. Серия 1. Электроника СВЧ. – 1990. – Вып. 5. – С. 22-25. **4.** *Гельвич Э.А., Обрезан О.И., Самохин Г.С.* Изучение спектров выходных сигналов широкополосных усилителей // Электронная техника. Серия 1. – 1979. – №1. – С. 24-39. **5.** *Зубов С.В., Обрезан О.И.* Исследование импульсного режима ГЛПД // Электронная техника. Сер. Электроника СВЧ. – 1984. – Вып. 5. – С. 41-43.

Поступила в редколлегию 26.03.2010