

**ЭЛЕКТРОНИКА
И РАДИОТЕХНИКА**

УДК 681.2.082; 681.7.069

**ОЦЕНКА ПОЛОСЫ РАБОЧИХ ЧАСТОТ ЭЛЕКТРООПТИЧЕСКИХ
МОДУЛЯТОРОВ НА ОСНОВЕ ИЗМЕРЕНИЯ ХАРАКТЕРИСТИЧЕСКИХ
ПАРАМЕТРОВ КОПЛАНАРНЫХ ВОЛНОВОДОВ**

**©2026 г. Ю. М. Соколов, В. В. Стоякин, А. С. Сурков*, В. Н. Трещиков,
В. А. Харламов**
ООО "Т8"

Россия, 107076, Москва, ул. Краснобогатырская, 44, стр.1

**E-mail: surkov@t8.ru*

Поступила в редакцию 28.04.2026

После доработки 21.05.2026

Принята к публикации 16.07.2026

Предлагаемая статья посвящена вопросам расчета ширины полосы рабочих частот электрооптического модулятора, которая определяется значением максимальной рабочей частоты модулятора. Приведена формула, позволяющая оценить максимальную рабочую частоту модулятора на основе значений скорости и затухания электрической СВЧ-волны в копланарном волноводе модулятора, а также методика вычисления и измерения этих параметров и подбора согласующей нагрузки копланарного волновода.

Достичь необходимой полосы рабочих частот в десятки и сотни ГГц в современных электрооптических модуляторах возможно лишь при использовании в них режима бегущей волны, суть которого состоит в синхронном движении светового потока в оптическом канале и модулирующего электрического сигнала в копланарном волноводе, взаимодействующего с этим каналом. При этом точность согласования скоростей критически влияет на ширину полосы рабочих частот.

Для передачи оптического сигнала со скоростями в десятки и сотни мегабит в секунду по волоконно-оптическим линиям на расстояния в сотни и тысячи километров требуются электрооптические модуляторы с полосой рабочих частот (полосой модуляции) в десятки и сотни ГГц [1]. Актуальная задача по реализации указанных выше параметров по полосе модуляции может быть решена лишь с использованием модуляторов бегущей волны в режиме, при котором модулирующий электрический сигнал движется в активной зоне модулятора синхронно со световым потоком. Такие модуляторы строятся, как правило, по схеме Маха–Цендера на основе кристаллов с линейным электрооптическим эффектом (эффектом Поккельса).

Согласование скорости модулирующего электрического сигнала со световым потоком достигается применением копланарного волновода специальной конструкции, позволяющей добиться значения скорости электрической СВЧ-волны, близкой к скорости светового потока в оптическом канале активной зоны модулятора. При этом точность согласования скоростей является важнейшим параметром, влияющим на ширину полосы модуляции. Другим важнейшим параметром, влияющим как на эффективность, так и на ширину полосы модуляции, является значение затухания электрической СВЧ-волны в копланарном волноводе. Кроме этого, для реализации режима бегущей волны копланарный волновод должен быть согласован на выходе.

Настоящая статья посвящена вопросам измерения и расчета так называемых вторичных или характеристических параметров копланарных волноводов электрооптических модуляторов Маха–Цендера и вычислению на их основе ширины полосы модуляции по представленной в статье формуле. Описана методика определения значений скорости и затухания электрической СВЧ-волны в копланарном волноводе модулятора и оценки волнового сопротивления копланарного волновода – параметра, необходимого для выбора согласующей нагрузки.

Вторичными или характеристическими параметрами копланарных волноводов электрооптических модуляторов являются β -коэффициент фазы (однозначно связанный со скоростью СВЧ-волны в копланарном волноводе: $V = 2\pi f / \beta$), α – коэффициент затухания СВЧ-волны и Z_B – волновое сопротивление копланарного волновода.

Методы измерения перечисленных выше параметров достаточно полно изложены в работе [2]. В настоящее время указанные выше параметры удобнее всего измерять с помощью векторного анализатора цепей, используя частотные зависимости комплексных значений отражений S_{11} от начала или конца разомкнутого или короткозамкнутого копланарного волновода (как длинной линии). Из-за малых размеров контактных площадок копланарного волновода (размер площадок 170 мкм на 170 мкм, расстояние между контактными площадками 180 мкм) для подключения анализатора векторных цепей к копланарному волноводу используется зондовая станция с зондами соответствующего размера. Перед проведением измерений с применением зондовой станции необходимо провести однопортовую калибровку анализатора. Процедура проведения калибровки и дальнейших измерений описана в работе [3], схема измерения отражений (S_{11}) от входа разомкнутого копланарного волновода приведена на рис. 1.

Рис.1. Схема измерения отражений (S_{11}) от входа разомкнутого копланарного волновода...

Необходимые для дальнейших расчетов комплексные численные значения отражений S_{11} вычисляются векторным анализатором цепей в режиме построения круговой диаграммы (диаграммы Вольперта–Смита).

Круговая диаграмма зависимости отражений S_{11} копланарного волновода одного из образцов в режиме холостого хода от частоты приведена на рис. 2, а соответствующие графики зависимостей модуля и фазы отражений S_{11} от частоты – на рис. 3, 4.

Рис. 2. Снимок с экрана анализатора векторных цепей P4226 с круговой диаграммой зависимости отражений S_{11}

Рис. 3. Зависимость модуля отражений S_{11} копланарного волновода модулятора от

Рис. 4. Зависимость фазы отражений S_{11} копланарного волновода модулятора от частоты

Используя значения модуля и фазы отражений S_{11} точек круговых диаграмм, можно определить фазовую скорость электрической волны в копланарном волноводе модулятора (замедление фазовой скорости относительно скорости света):

$$V = 2l(f_n - f_{n-1}),$$

где f_n и f_{n-1} – частоты соседних экстремумов максимумов или минимумов на рис. 3 или нулей на рис. 4 (пересечение нуля при скачках фазы отражений с -180° до $+180^\circ$ не учитывается),

l – длина копланарного волновода модулятора и коэффициент затухания α :

$$\alpha = -\ln(|S_{11}|)/2l.$$

При расчетах фазовой скорости электрической волны в копланарном волноводе для повышения точности в качестве расчетных точек по частоте выбраны нули фазы отражений S_{11} , значения частоты которых находятся при помощи линейной интерполяции по двум точкам (одной в фазе “+”, другой в фазе “–”). Вблизи этих точек выбираются и значения $|S_{11}|$ для определения α .

На рис. 5, 6 представлены результаты расчета зависимостей замедления фазовой скорости электрической волны и затухания α от частоты в копланарном волноводе.

Рис. 5. Результаты расчета зависимости замедления фазовой скорости электрической волны в копланарном волноводе

Рис. 6. График зависимости коэффициента затухания α СВЧ-волны в копланарном волноводе

Оценить значение волнового сопротивления копланарного волновода можно, используя то обстоятельство, что трасса круговой диаграммы при увеличении частоты сходится к точке, соответствующей Z_B – волновому сопротивлению. Для удобства оценки волнового сопротивления на круговую диаграмму наложены маркеры.

На рис. 7 приведена круговая диаграмма зависимости отражения S_{11} копланарного волновода от частоты для обратного включения (от выхода к входу) в режиме холостого хода с маркерами, отградуированными в значениях импеданса. Конструкция контактных площадок на выходе обеспечивает меньшую паразитную емкость в сравнении со входом, поэтому трасса круговой диаграммы при увеличении частоты на рис. 7 в большей степени смещается вниз в область отрицательных значений импеданса, что можно заметить из сравнения круговых диаграмм зависимостей отражений S_{11} на рис. 2 и 7.

Рис. 7. Снимок экрана анализатора векторных цепей P4226 с круговой диаграммой зависимости отражений S_{11}

Используя данные этой диаграммы, с учетом особенностей кривой трассы отражений S_{11} копланарного волновода можно оценить значение волнового сопротивления, в нашем случае $Z_B \sim 30$ Ом. Более точно волновое сопротивление можно определить с помощью непосредственных измерений векторным анализатором цепей на закороченном копланарном волноводе, однако практически это приводит к невозможности дальнейшего использования образца.

На рис. 8 приведена переходная характеристика копланарного волновода с коротким замыканием примерно на $2/3$ длины от частоты. Переходная характеристика позволяет непосредственно оценить волновое сопротивление копланарного волновода (около 31 Ом) на среднем участке (после перехода с волнового сопротивления соединительного кабеля 50 Ом до перехода на короткое замыкание с сопротивлением примерно 1 Ом).

Рис. 8. Снимок экрана анализатора векторных цепей P4226 с переходной характеристикой копланарного волновода.

Используя полученные данные по фазовой скорости электрической волны в копланарном волноводе модулятора (замедление фазовой скорости относительно скорости света) и коэффициент затухания α от частоты, можно рассчитать прогнозируемую зависимость электрооптического коэффициента передачи S_{21} модулятора Маха–Цендера от частоты.

С учетом затухания и рассогласования оптической и электрической волн в модуляторе Маха–Цендера выражение зависимости интенсивности света на выходе модулятора без учета собственного затухания световой волны будет представлять собой интеграл [4]

$$I = I_0 \left(\frac{\pi n_0^3 r}{\lambda} \right)^2 \int_0^L (E_0 e^{-\alpha x} \cos(\xi x))^2 dx, \quad (1)$$

где α – погонное затухание в копланарном волноводе модулятора Маха–Цендера, ξ – погонное рассогласование оптической и электрической волн на участке dx , $\xi x = 2\pi\tau/T$, τ –

разбег по времени между оптической и электрической волнами на участке dx на расстоянии x , $T = 1/f$, где f – частота электрической волны (сигнала),

$$\tau = \tau_{\text{оп}} - \tau_c = \left| \frac{x}{v_{\text{оп}}} - \frac{x}{v_c} \right| = \left(\frac{x}{c} \right) |n_0 - N|,$$

где n_0 – коэффициент преломления для световой волны, N – коэффициент замедления для электрической волны (сигнала), $N = c/v_c$, где v_c – скорость электрической волны (сигнала), следовательно,

$$\xi = \frac{2\pi f |n_0 - N|}{c}.$$

Из выражения (1) после интегрирования, подстановки пределов и нормирования на интенсивность света на входе модулятора I_0 можно вывести формулу прогнозируемой зависимости нормированного электрооптического коэффициента передачи S_{21} контролируемого модулятора Маха–Цендера от частоты (нормировка на значение S_{21} на низких частотах):

$$S_{21 \text{ норм}}(f) = \frac{\left(\frac{\pi n_0^3 r}{\lambda} \right)^2}{\xi \left[\left(\frac{2\alpha}{\xi} \right)^2 + 4 \right]} \left\{ e^{-2\alpha L} \cos(\xi L) \left[2 \sin(\xi L) - \frac{2\alpha}{\xi} \cos(\xi L) \right] - \frac{\xi}{\alpha} e^{-2\alpha L} + \frac{2\alpha}{\xi} + \frac{\xi}{\alpha} \right\}. \quad (2)$$

Рассчитанные значения усредненного замедления СВЧ-волны в копланарных волноводах и полученные данные о зависимости коэффициента затухания α от частоты позволяют произвести расчеты с целью прогноза зависимости электрооптических коэффициентов передачи S_{21} модуляторов, собранных с использованием кристаллов с этими копланарными волноводами.

В качестве примера на рис. 9 приведен график спрогнозированной нормированной зависимости электрооптической характеристики передачи S_{21} от частоты для модулятора, параметры копланарного волновода которого были измерены по изложенной выше методике.

Рис. 9. Прогнозируемая зависимость нормированного коэффициента передачи $S_{21 \text{ норм}}$.

Достоинством предложенной методики измерения характеристических параметров копланарных волноводов модуляторов Маха–Цендера является то, что модулятор не подвергается необратимым воздействиям (пайке, приварке проводников и т.д.), что позволяет использовать ее для входного контроля с возвратом некондиционной продукции производителю. На основе предложенной методики входного контроля параметров и прогнозирования технических характеристик копланарных волноводов электрооптических модуляторов предполагается создание автоматизированного стенда.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Трещиков В.Н., Листвин В.Н.* DWDM-системы. серия Мир связи. Москва: Техносфера, 2024.
2. *Дансмор Д.П.* Настольная книга инженера. Измерения параметров СВЧ-устройств с использованием передовых методик векторного анализа цепей. Пер. с англ. под научн. ред. Е.Ю. Харитоновой, Е.В. Андроновой, А.С. Бондаренко. Москва: Техносфера, 2018.
3. Анализаторы цепей векторные Р4213/Р4226, руководство по эксплуатации ЖНКЮ.468166.032 РЭ, АО НПФ “Микран”, г. Томск, 2019. <https://www.micran.ru>
4. Волновая электроника. Под ред. Т. Тамира, Москва.: Мир, 1991.

ПОДПИСИ К РИСУНКАМ

- Рис.1.** Схема измерения отражений (S_{11}) от входа разомкнутого копланарного волновода (режим холостого хода): 1 – анализатор векторных цепей, 2 – соединительный кабель между портом 1 анализатора и зондовой станцией, 3 – зондовая станция, 4 – копланарный волновод, 5 – вход копланарного волновода, 6 – выход копланарного волновода, 7 – направление распространения прямой (падающей) волны, 8 – направление распространения обратной (отраженной) волны, 9 – оптические каналы
- Рис. 2.** Снимок с экрана анализатора векторных цепей P4226 с круговой диаграммой зависимости отражений S_{11} копланарного волновода от частоты для случая прямого включения копланарного волновода в режиме холостого хода (в соответствии с рис. 2) с маркерами на трассе на частотах 25.38, 25.4, 26.25 и 26.32 ГГц
- Рис. 3.** Зависимость модуля отражений S_{11} копланарного волновода модулятора от частоты
- Рис. 4.** Зависимость фазы отражений S_{11} копланарного волновода модулятора от частоты
- Рис. 5.** Результаты расчета зависимости замедления фазовой скорости электрической волны в копланарном волноводе модулятора от частоты, среднее значение 2.26 (для точного согласования со скоростью света в ниобате лития требуется примерно 2.155)
- Рис. 6.** График зависимости коэффициента затухания α СВЧ-волны в копланарном волноводе от частоты
- Рис. 7.** Снимок экрана анализатора векторных цепей P4226 с круговой диаграммой зависимости отражений S_{11} копланарного волновода от частоты для случая обратного включения (от выхода к входу) в режиме холостого хода с маркерами, отградуированными в значениях импеданса: $S_{11} = 16.28 - j6.035$ при $f = 24.14$ ГГц; $S_{11} = 19.417 - j0.756$ при $f = 24.35$ ГГц; $S_{11} = 42.105 - j 0.631$ при $f = 24.86$ ГГц; $S_{11} = 44.777 - j14.006$ при $f = 25.04$ ГГц.
- Рис. 8.** Снимок экрана анализатора векторных цепей P4226 с переходной характеристикой копланарного волновода. По оси ординат – волновое сопротивление, по оси абсцисс – время. Видны переходы с волнового сопротивления соединительного кабеля 50 Ом на волновое сопротивление копланарного волновода примерно 31 Ом при $t \approx 15$ пс и далее на короткое замыкание (сопротивление около 1 Ом) при $t \approx 300$ пс
- Рис. 9.** Прогнозируемая зависимость нормированного коэффициента передачи $S_{21\text{норм}}$ от частоты для модулятора, построенная с использованием измеренных согласно предложенной методике параметров копланарного волновода

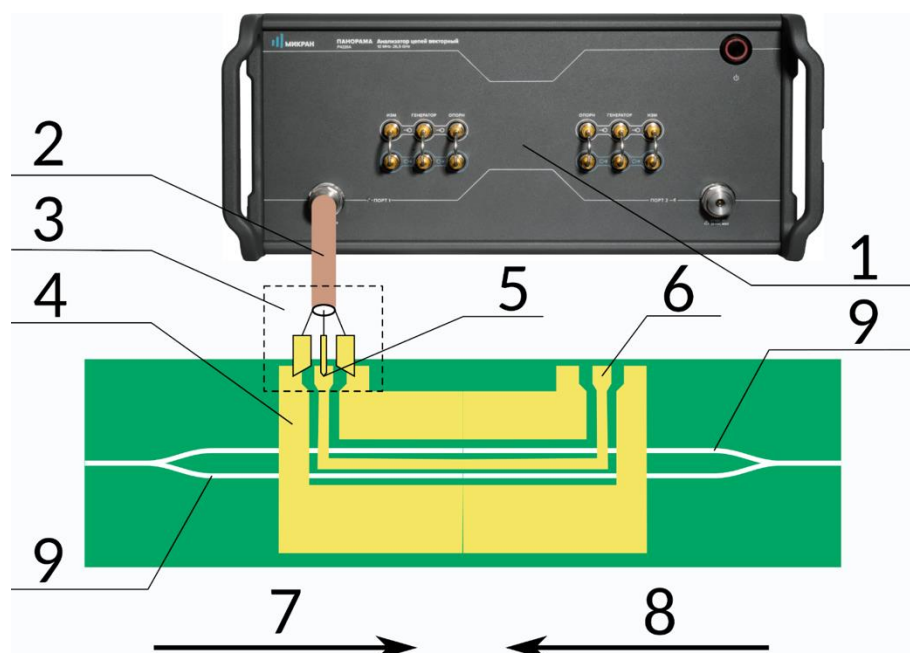


Рис. 1.

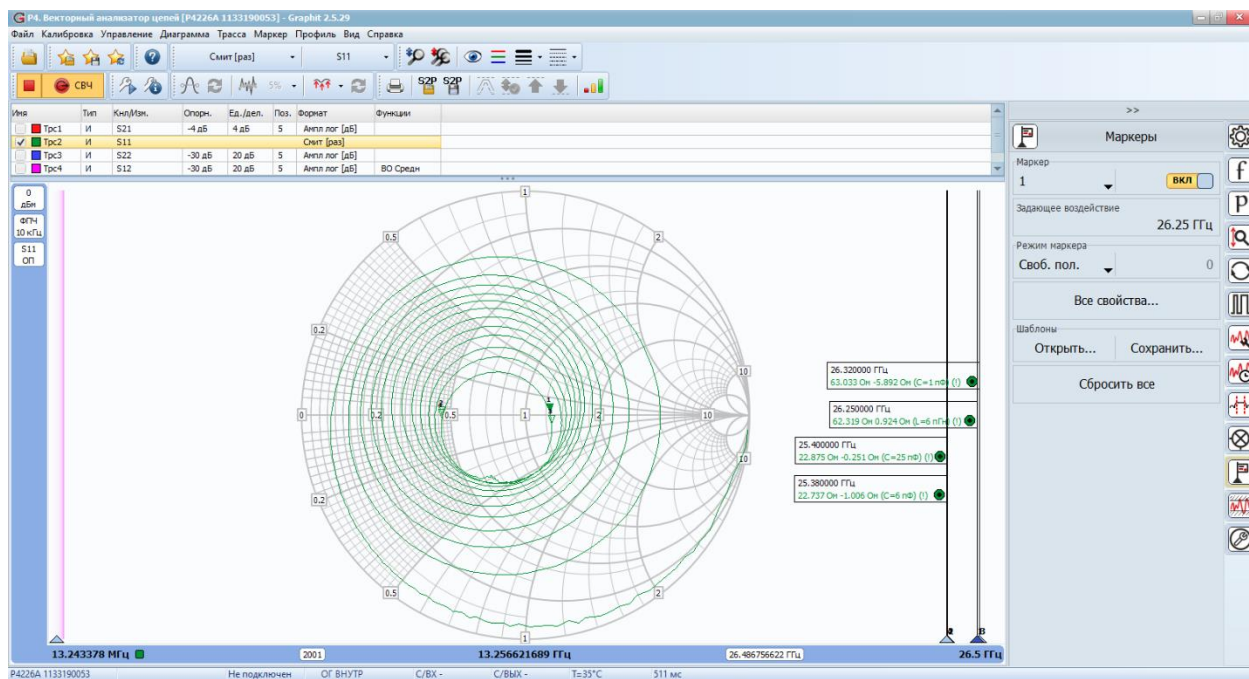


Рис. 2.

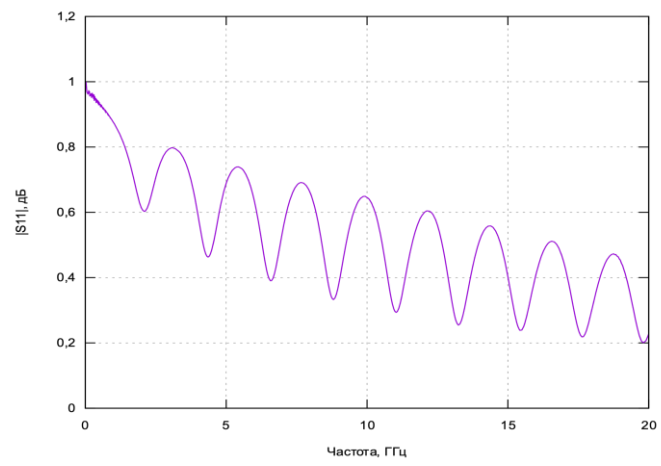


Рис. 3.

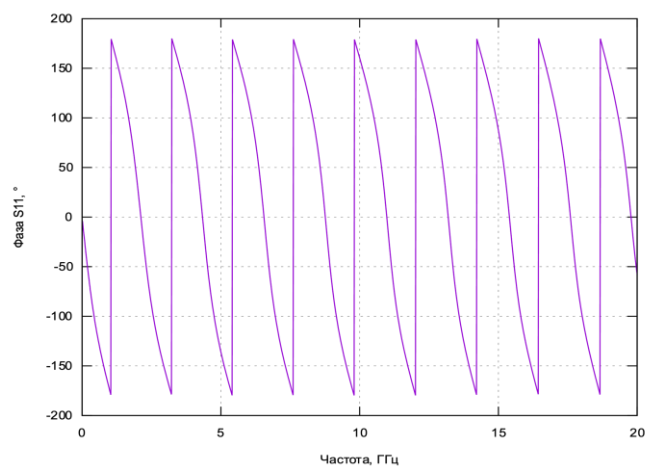


Рис. 4.

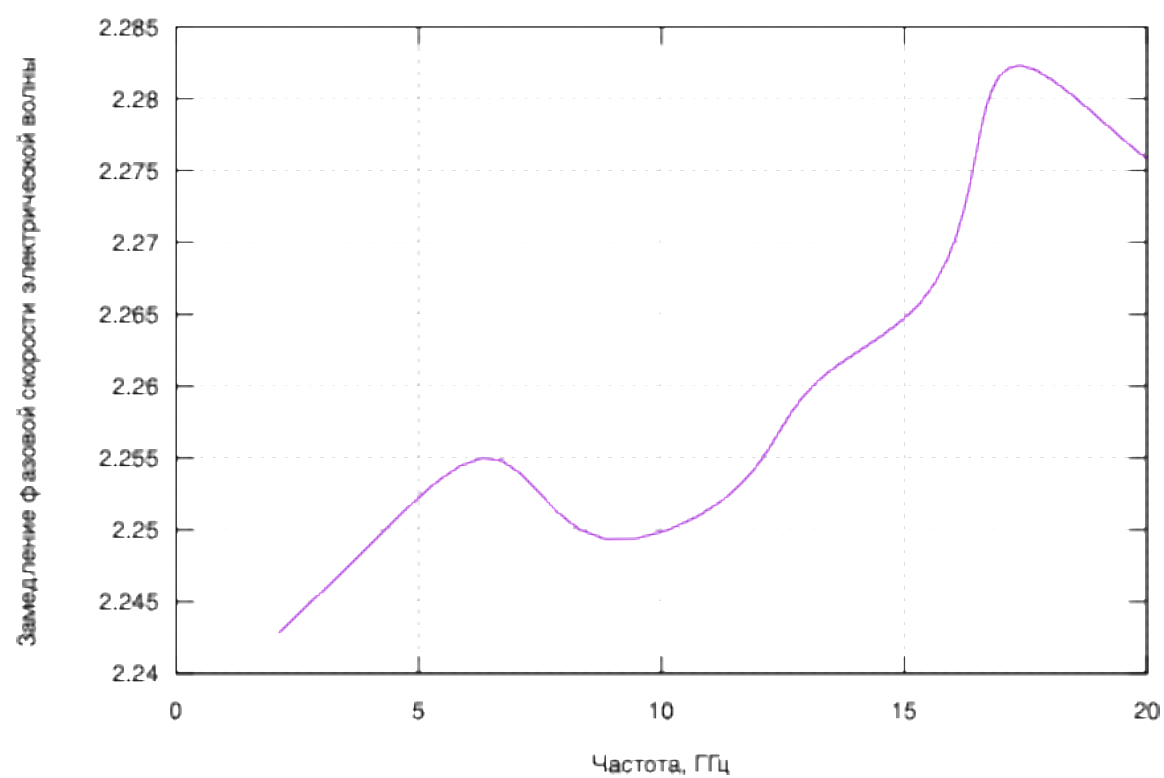


Рис. 5.

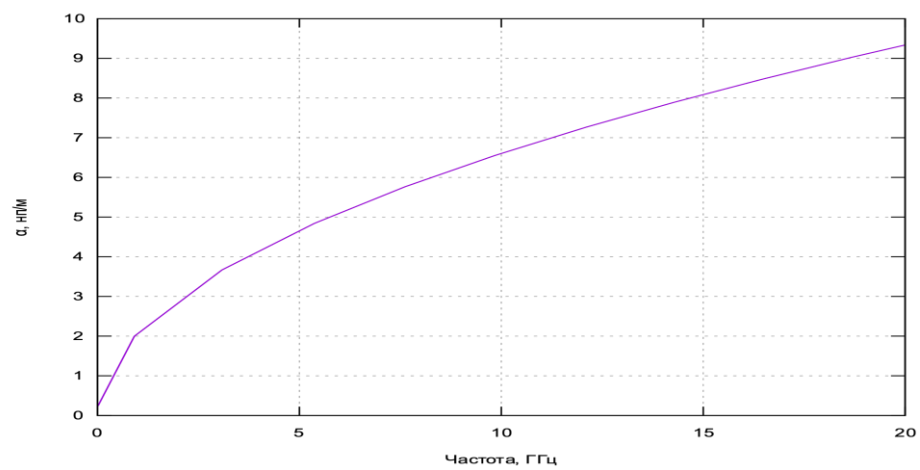


Рис. 6.

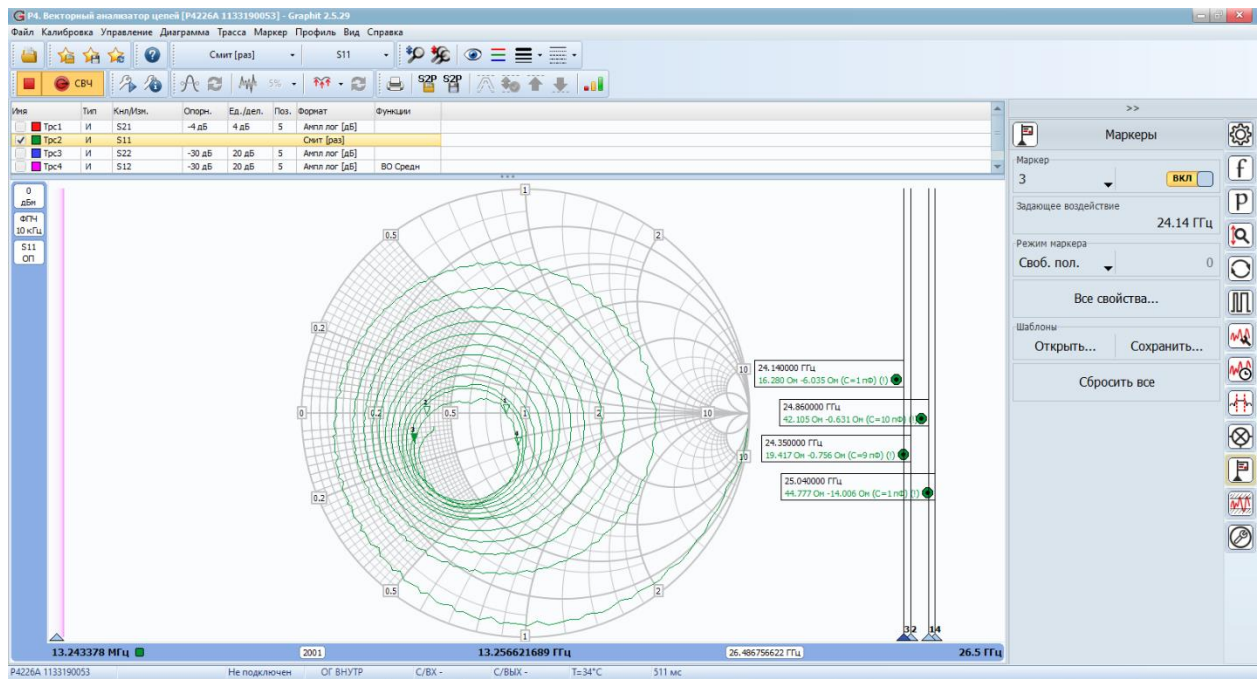


Рис. 7.

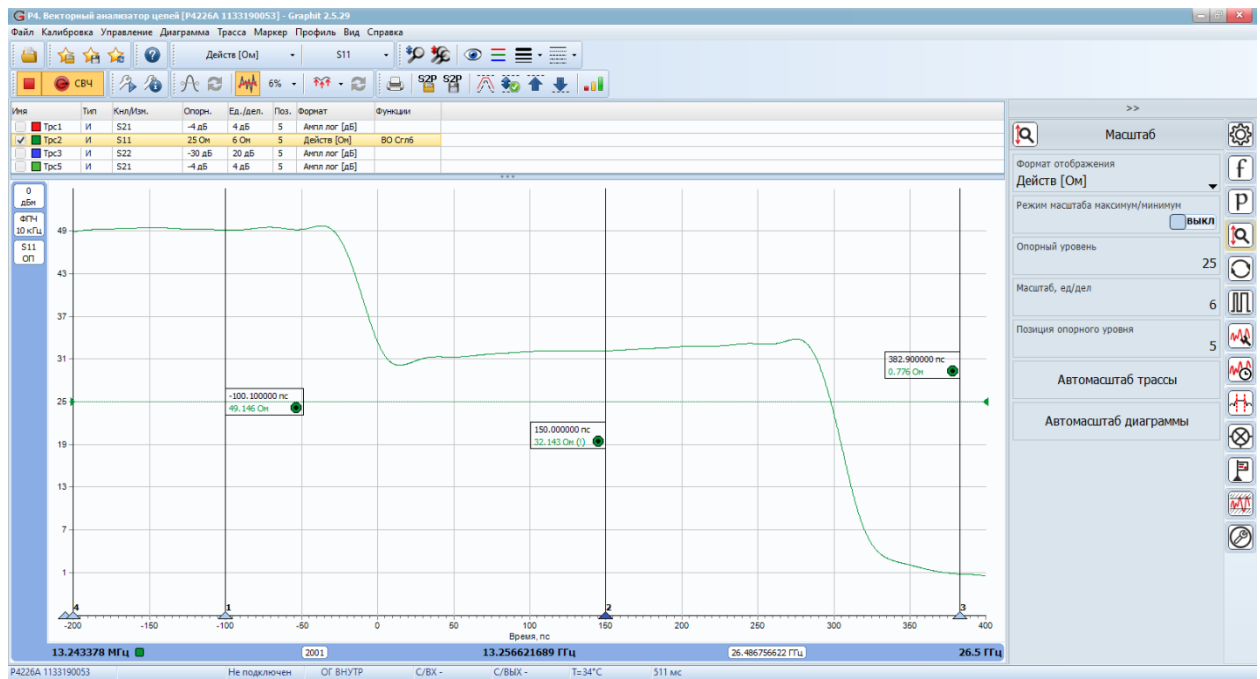


Рис. 8.

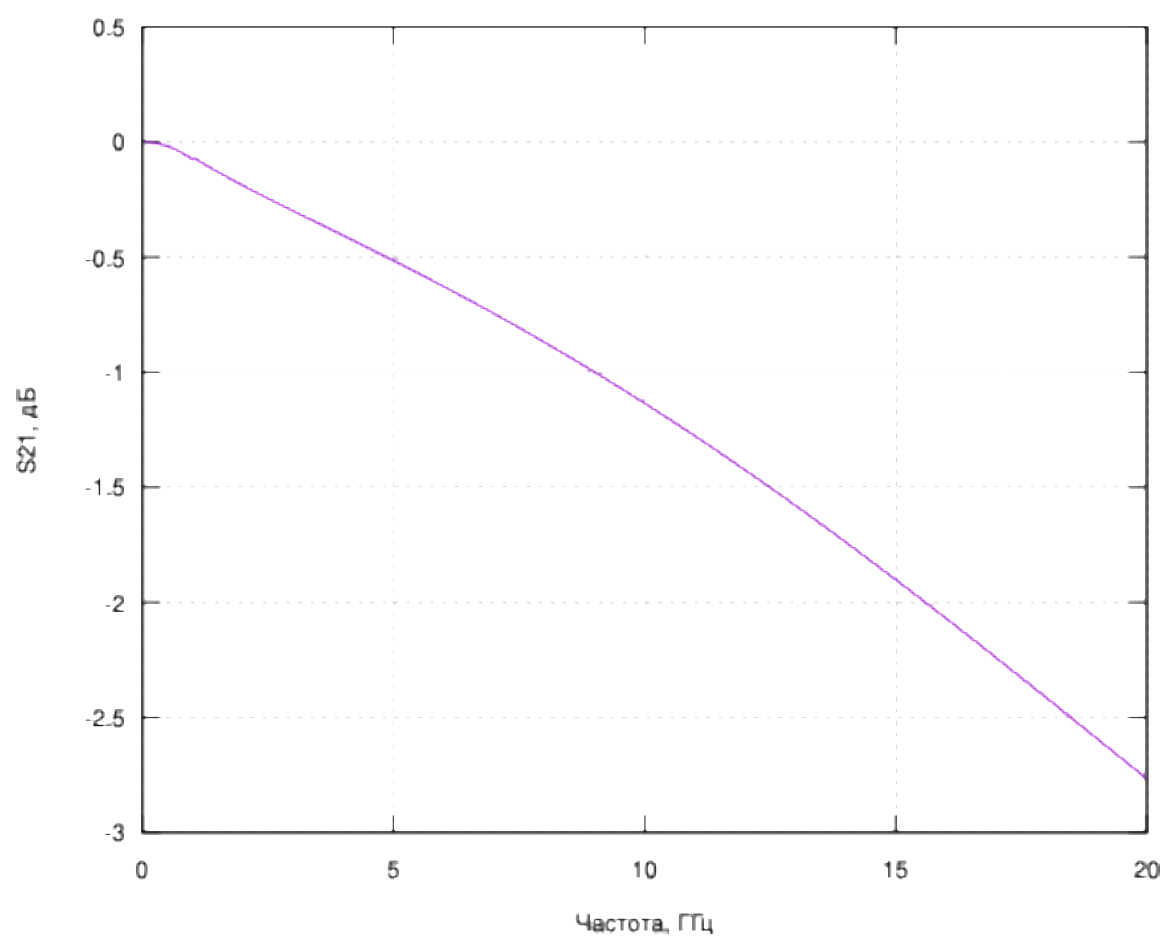


Рис. 9