

**ЭЛЕКТРОНИКА
И РАДИОТЕХНИКА**

УДК 537.86

**ИМПУЛЬСНО-ПЕРИОДИЧЕСКИЙ ИСТОЧНИК НАНОСЕКУНДНЫХ
МИКРОВОЛНОВЫХ ИМПУЛЬСОВ, ОСНОВАННЫЙ НА
ГОФРИРОВАННОЙ ПЕРЕДАЮЩЕЙ ЛИНИИ
С НАСЫЩЕННЫМ ФЕРРИТОМ**

**© 2026 г. П. В. Припутнев*, И. В. Романченко', В. Ю. Конев,
Р. К. Собянин, Ю. А. Андреев, В. В. Плиско**

*Институт сильноточной электроники Сибирского отделения Российской академии наук
Россия, 634055, Томск, просп. Академический, 2/3*

**e-mail: pv.priputnev@hcei.ru*

Поступила в редакцию 15.12.2025 г.

После доработки 25.12.2025 г.

Принята к публикации 30.01.2026 г.

Разработан и экспериментально протестирован источник наносекундных высокочастотных импульсов на основе нелинейной передающей линии с насыщенным ферритом (НПЛ), работающий в S-диапазоне частот. Его ключевой особенностью является отсутствие в конструкции электромагнитов, насыщающих ферритовое заполнение линии. Источник состоит из обостряющей НПЛ с ненасыщенным ферритом, гофрированной НПЛ, коаксиального фильтра высоких частот и комбинированной антенны. Обостряющая и гофрированная линии используют ферритовые NiZn-кольца. Для насыщения феррита в гофрированной линии используются постоянные NdFeB-магниты. Линия обеспечивает эффективную генерацию высокочастотных импульсов в диапазоне частот 2.7–3.6 ГГц. Диапазон рабочего напряжения источника 50–190 кВ. Коаксиальный фильтр высоких частот имеет полосу пропускания 1.2–4 ГГц, что позволяет эффективно излучать возбуждаемые в линии колебания, а также высокочастотную энергию, сосредоточенную на фронте импульса напряжения. Комбинированная антенна имеет рабочий диапазон 1–4 ГГц. В работе реализован импульсно-периодический режим работы источника с частотой следования импульсов 50 Гц до 2000 импульсов в последовательности. При рабочем напряжении 170 кВ центральная частота излученного импульса составляет 3.4 ГГц. Эффективный потенциал источника равен 65 кВ.

1. ВВЕДЕНИЕ

Развивающиеся на протяжении последних пятидесяти лет источники микроволновых импульсов большой мощности остаются актуальными и сегодня. Возрастающая потребность в решении задач электромагнитной совместимости мотивирует к проведению новых исследований [1]. Это тесно связано с прогрессом в области разработки новых материалов, совершенствованием методов их обработки, увеличением доступных вычислительных

мощностей и развитием машинного обучения и искусственного интеллекта [2]. Приборы мощной высокочастотной электроники в большинстве случаев основаны на преобразовании энергии ускоренных потоков электронов в энергию высокочастотных колебаний. Параллельно с ними в течение последних 30 лет активно развиваются твердотельные системы (микроволновые устройства, не основанные на преобразовании энергии движения свободных электронов), к которым традиционно относятся сверхширокополосные источники и нелинейные передающие линии (НПЛ).

Физическим принципом работы НПЛ является распространение ударных электромагнитных волн [3] в среде с выраженными дисперсионными свойствами вблизи частот, составляющих единицы ГГц. Формирование ударных волн обеспечивают нелинейные материалы, такие как диэлектрики, магнетики и полупроводниковые диоды [4–9]. Системы на основе НПЛ обычно используют нелинейные магнетики – ферриты в схемах с сосредоточенными параметрами или в распределенных линиях. Максимальные мощность и энергия микроволновых импульсов достигаются в распределенных линиях, где однородное ферритовое заполнение насыщается в магнитном поле соленоида. Линии с сосредоточенными параметрами позволяют генерировать импульсы длительностью до нескольких десятков нс [7]. Твердотельная конструкция источников импульсов на основе НПЛ упрощает их транспортировку и эксплуатацию.

Нелинейные передающие линии с ферритом эффективны до S-диапазона частот, они обеспечивают пиковую мощность от нескольких десятков до сотен МВт. В настоящее время достигнуты значения пиковой мощности до 700 МВт, а энергетическая эффективность преобразования энергии видеоимпульса в радиоимпульс составляет 10% [10, 11]. На сегодняшний день продемонстрирована возможность возбуждения колебаний в диапазоне от 0.5 до 20 ГГц с возможностью изменения частоты генерации в реальном времени до 20%. Источники излучения, основанные на НПЛ, характеризуются сверхширокополосным спектром. Для излучения импульсов используются антенны различных конструкций: рупорные, ТЕМ-рупоры, спиральные, комбинированные и антенны Власова [12–18]. Созданные системы с выводом излучения в открытое пространство могут иметь один, два или четыре канала [12–18] в частотном диапазоне до 8 ГГц. Многоканальные системы обеспечивают сканирование луча на 15–20° в горизонтальной плоскости, а напряженность электрического поля достигает единиц кВ/см на расстоянии нескольких метров.

Помимо генерации высокочастотных импульсов, НПЛ с ферритом применяются и для решения других задач импульсной техники. Исторически первым применением стало

обострение фронта высоковольтного импульса [19, 20]. Нелинейные передающие линии с предварительным подмагничиванием и без него позволили сократить длительность наносекундного фронта до субнаносекундных значений. Развитие методики обострения фронта, в том числе создание многоступенчатых систем, позволило разработать линии магнитной компрессии, используемые для сжатия во времени энергии импульсов постоянного напряжения [21, 22]. Максимальная мощность пикосекундного импульса, достигнутая при помощи магнитной компрессии, составляет 100 ГВт при амплитуде напряжения 2.2 МВ и нагрузке 48 Ом [23]. В дополнение к обострению фронта импульсов НПЛ используются как линии задержки для синхронизации многоканальных источников микроволнового излучения на основе ферритовых линий и релятивистских ламп обратной волны [15, 16, 24–28].

В настоящее время актуальной задачей является повышение энергетической эффективности источников на основе линий с ферритом. Применение микроволновых ферритовых колец или колец, специально разработанных для задач генерации высокочастотных импульсов, способствует повышению эффективности преобразования энергии видеоимпульса в энергию колебаний [29–31]. Тем не менее, с точки зрения конечного потребителя, общая энергоэффективность будет мала при учете потребляемой электроэнергии от сети. Основная энергия, потребляемая от сети, уходит на создание магнитного поля, насыщающего ферритовое заполнение линии. Использование постоянных магнитов для насыщения ферритового заполнения линий позволяет на порядок повысить общую энергоэффективность генераторов [31–34]. Дальнейшим шагом в этом направлении может стать применение схем с повторным использованием оставшейся энергии видеоимпульса для возбуждения еще одной ферритовой линии [35].

2. ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ФЕРРИТОВЫХ НПЛ

2.1. Ферритовые НПЛ с однородным ферритовым заполнением

Традиционной конфигурацией НПЛ с насыщенным ферритом является коаксиальная линия длиной 50–100 см (рис. 1), в которой феррит в виде колец длиной порядка 10 мм каждое располагается между проводниками линии. Для повышения электрической прочности линия заполняется маслом или SF₆. С целью насыщения ферритового заполнения линию помещают внутрь соленоида с магнитным полем, достигающим 100 кА/м.

Рис. 1. Коаксиальная НПЛ с однородным ферритовым заполнением.

Работы по обострению фронта высоковольтных импульсов и генерации высокочастотных импульсов базируются на теории ударных электромагнитных волн [7, 36–40]. Под ударной

электромагнитной волной (УЭМВ) понимается процесс быстрого изменения или скачок полевых величин на некотором пространственном интервале, который в общем случае является движущимся. Динамика полей на этом интервале описывается уравнениями более высокого порядка по сравнению с уравнениями, описывающими поле вне интервала. Образование ударной волны описывается уравнениями электродинамики и феноменологическими уравнениями нелинейных сред, в которых они формируются. С точки зрения эксперимента, УЭМВ представляет собой волну напряжения с коротким фронтом, обостренным в результате нелинейных процессов в линии, длительность которого уже не может стать меньше определенного значения. Для рассмотрения передающих линий, заполненных ферритом, требуется феноменологическое уравнение, описывающее динамику вектора намагниченности \mathbf{M} . Если характерный масштаб времени изменения магнитного поля большой, то связь между вектором магнитной индукции \mathbf{B} и вектором напряженности магнитного поля \mathbf{H} может считаться не зависящей от скорости и, если не учитывать анизотропию и гистерезисные явления, эти векторы коллинеарны и зависимость между ними однозначна. В случае быстрого изменения поля необходимо переходить к динамическим моделям. Для этого пользуются макроспиновым приближением. В макроспиновом приближении феноменологическим уравнением, описывающим насыщенный феррит, является уравнение Ландау–Лифшица [41–43]:

$$\frac{d\mathbf{M}}{dt} = \gamma[\mathbf{M} \times \mathbf{H}] + \frac{\alpha\gamma}{M_s} [\mathbf{M} \times [\mathbf{M} \times \mathbf{H}]], \quad (1)$$

где γ – гиромагнитное отношение для электрона, α – феноменологический коэффициент затухания, M_s – намагниченность насыщения.

При подаче на вход линии с насыщенным ферритом высоковольтного импульса, создающего в ней ток, магнитное поле которого соизмеримо с насыщающим полем, в НПЛ произойдет импульсное перемагничивание ферритового заполнения. Фронт импульса напряжения вначале обострится, затем при достаточной длине линии, обладающей дисперсионными свойствами, на вершине импульса напряжения появится модуляция высокочастотными колебаниями.

Что касается дисперсионных свойств однородной коаксиальной линии с ферритом, то здесь можно выделить два основных механизма. Первый связан с дисперсионными свойствами, обусловленными исключительно магнитным материалом заполнения [15]. Второй, по всей видимости наиболее значимый, – это дисперсия волны TM_{00} (квази-ТЕМ) линии с двойным диэлектрическим заполнением [44].

2.2. Гофрированная НПЛ с ферритом

Гофрированная НПЛ (ГНПЛ) представляет собой коаксиальную линию с гофрированным внутренним проводником (рис. 2). Ферритовые кольца расположены в пазах гофрировки, а постоянные NdFeB-магниты вмонтированы внутрь гофрированного проводника. Масса постоянных магнитов в такой конфигурации, как правило, не превышает 1 кг. Для повышения электрической прочности пространство между проводниками также заполнено маслом.

Рис. 2. Гофрированная НПЛ.

Отличием ГНПЛ от традиционной распределенной линии является то, что дисперсия в линии в первую очередь определяется геометрическими параметрами гофрировки. Для того чтобы понять механизм дисперсии, необходимо перейти к электрической схеме замещения гофрированной линии. Схема замещения представляет собой линию с сосредоточенными параметрами с емкостной связью между соседними ячейками (рис. 3), а ее дисперсионное соотношение имеет следующий вид:

$$\omega^2 = \frac{4\omega_0^2 \sin^2(kd/2)}{1+4\gamma \sin^2(kd/2)}. \quad (2)$$

Здесь ω – круговая частота, k – волновое число, d – пространственная длина ячейки линии, $\omega_0 = (LC)^{1/2}$, $\gamma = C^*/C$.

Рис. 3. Схема замещения ГНПЛ.

3. КОНСТРУКЦИЯ ГНПЛ

Целью работы являлось создание источника наносекундных высокочастотных импульсов на основе НПЛ, в составе которого нет электромагнитов, что существенно повышает его полную энергоэффективность. Основной задачей являлась разработка гофрированной линии с постоянными магнитами импедансом 30 Ом, основанной на использовании стандартных ферритовых NiZn-колец марки 200ВНП, работающей в S-диапазоне частот и диапазоне напряжений от 50 до 200 кВ. Верхний предел напряжения определен условием электрического пробоя вакуумного масла ($\epsilon = 2.2$), используемого в качестве диэлектрического заполнения. В линии использованы ферритовые кольца размерами 10×6 мм². Проектирование ГНПЛ основывалось на анализе ее дисперсионных характеристик и последующей оптимизации посредством численного моделирования.

3.1. Дисперсионные свойства ГНПЛ

Дисперсионная кривая разработанной ГНПЛ представлена на рис. 4. Кривые, рассчитанные по формуле (2) и полученные моделированием с использованием CST Studio [45],

демонстрируют хорошее соответствие. Емкость периода линии $C = 3.4$ пФ, индуктивность $L = 2.5$ нГн, коэффициент емкостной связи ячеек линии составляет $\gamma = 0.08$. Ввиду того, что увеличение данного коэффициента приводит к значительному снижению частоты генерации, было выбрано его наименьшее возможное значение для обеспечения полного попадания рабочего частотного диапазона линии в S-полосу.

Рис. 4. Дисперсионные кривые разработанной ГНПЛ.

3.2. Численное моделирование ГНПЛ

Моделирование линий с насыщенным ферритом может быть выполнено при использовании различных методов: это 1D-методы, использующие схемы замещения линий [39, 46, 47], 2D- и 3D-моделирование с использованием Comsol Multiphysics [44] или FDTD-метода (метод конечных разностей во временной области) [48, 49], в котором совместно решаются уравнения Максвелла и уравнение Ландау–Лифшица (1). Для моделирования ГНПЛ лучше всего подходит FDTD-метод, благодаря его устойчивости и скорости выполнения расчетов, особенно при использовании осесимметричных моделей [50].

Основной задачей моделирования являлась оптимизация геометрии гофрированной линии с целью минимизации паразитных параметров схемы замещения линии, которые отсутствуют на рис. 3. Типичная осциллограмма импульса напряжения на выходе линии и его спектр, полученные моделированием, представлены на рис. 5. Осциллограмма получена в согласованном порту в конце измерительного коаксиала, она соответствует ГНПЛ, имеющей 90 периодов гофрировки, что оказалось оптимальным для данной конфигурации и было реализовано в эксперименте. Падающий импульс представлял собой трапецию с передним и задним фронтами, равными 1 нс, длительность импульса по полувысоте составляла 6 нс.

Рис. 5. Импульс напряжения на выходе ГНПЛ (а) и его спектр (б), полученные численным моделированием.

В результате серии численных расчетов была получена зависимость центральной частоты высокочастотных колебаний от аксиального магнитного поля внутри феррита H_z при предполагаемом рабочем напряжении линии 170 кВ. Она представлена на рис. 6. На основании результатов был сделан вывод, что усредненное поле H_z внутри феррита линии должно составлять 49 кА/м. Это значение является оптимальным как с точки зрения эффективности генерации линии, так и с точки зрения ее технической реализации, и оно было выбрано для экспериментального макета линии. Зависимость центральной частоты высокочастотных колебаний от напряжения падающего импульса при поле внутри феррита $H_z = 49$ кА/м представлена на рис. 7.

Рис. 6. Зависимость центральной частоты генерации ГНПЛ от аксиального магнитного поля, полученная моделированием.

Рис. 7. Зависимость центральной частоты генерации ГНПЛ от напряжения при аксиальном поле 49 кА/м, полученная моделированием.

4. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ГНПЛ

На первом этапе экспериментальной части работы линия испытывалась в схеме с резистивной нагрузкой. Схема проведения эксперимента представлена на рис. 8. Импульс от генератора наносекундных высоковольтных импульсов SINUS-200 [51] подавался на вход экспериментальной установки. Для уменьшения длительности фронта импульса напряжения, составлявшей 3 нс при напряжении 170 кВ, использовалась секция коаксиальной НПЛ с ненасыщенным ферритом. Обостренный импульс напряжения подавался на вход ГНПЛ, а импульс на ее выходе поглощался в согласованной резистивной нагрузке 30 Ом. До и после нелинейных линий располагались отрезки измерительных коаксиальных линий, обеспечивающие временную развязку 8 нс. Измерения проводились при помощи дифференциальных емкостных датчиков, расположенных в измерительных линиях.

Рис. 8. Схема эксперимента с резистивной нагрузкой.

4.1. Обостряющая НПЛ

Поскольку целью работы являлась разработка источника, не использующего электромагниты, для обострения фронта высоковольтного импульса использовалась коаксиальная линия, заполненная ненасыщенным ферритом.

Обострение фронта в линии с ненасыщенным ферритом связано с диссипацией энергии на фронте импульса тока при импульсном перемагничивании феррита. Расчет параметров обострения фронта может быть осуществлен при использовании модели стационарной ударной электромагнитной волны, основанной на теории некогерентного перемагничивания феррита в магнитном поле, значительно превышающем коэрцитивную силу [3]. Длительность фронта стационарной УЭМВ по уровню 0.1–0.9 равна

$$\tau_{sh} = \frac{1+\alpha^2}{2\alpha\gamma H_f} f(m_0). \quad (3)$$

Здесь H_f – усредненное по объему феррита магнитное поле, $m_0 = M_0/M_s$, M_0 — начальная намагниченность феррита. Минимальная длина обостряющей линии, на которой формируется ударная волна, может быть оценена при помощи следующего выражения:

$$l = \frac{\tau_0}{v_0} \frac{H_f}{\eta M_s (1-m_0)}. \quad (4)$$

Здесь τ_0 – длительность фронта по уровню 0.1–0.9, v_0 – скорость волны в линии в отсутствие ферритового заполнения, η – коэффициент поперечного заполнения линии ферритом.

Для обострения фронта высоковольтного импульса использовалась коаксиальная линия с поперечными размерами $56 \times 28 \text{ мм}^2$, заполненная ферритовыми кольцами размером $45 \times 28 \text{ мм}^2$ и вакуумным маслом. В линии обострения использовались ферритовые кольца марки 150ВН, параметры которых таковы: начальное значение намагниченности равнялось остаточной намагниченности и составляло 0.13 Тл, намагниченность насыщения равна 0.32 Тл, $\alpha=0.15$. Согласно выражениям (3) и (4), длительность фронта ударной волны составляет 1.5 нс, а длина формирования УЭМВ равна 32 см.

В эксперименте было получено уменьшение длительности фронта высоковольтного импульса с 3 до 1.7 нс (рис. 9) в линии длиной 35 см. Небольшое расхождение с расчетными значениями, вероятно, обусловлено нелинейным фронтом падающего импульса, который определяется свойствами высоковольтного искрового разрядника генератора SINUS, что препятствует обострению той части фронта, где скорость изменения тока в линии значительно падает. Это приводит к тому, что фронт импульса, прошедший линию (красная линия на рис. 9), можно разделить на два участка: первый, близкий к линейному, составляет 80% фронта, оставшиеся 20% представляют собой нелинейный медленно растущий участок. Энергия импульса на входе обостряющей линии составляла 6.9 Дж, а энергия обостренного импульса составила 6.25 Дж. Таким образом, на практически двукратное уменьшение длительности фронта импульса было затрачено менее 10% энергии изначального импульса напряжения.

Рис. 9. Осциллограммы изначального (синий) и обостренного (красный) импульсов напряжения.

4.2. Результаты экспериментов с согласованной нагрузкой

Ниже приведены результаты измерений для экспериментов с ГНПЛ, нагруженной согласованной нагрузкой. Амплитуда падающего импульса напряжения варьировалась от 50 до 190 кВ. Измеренные формы импульсов на выходе линии показаны на рис. 10. При максимальной амплитуде падающего импульса колебания возбуждаются не на вершине импульса, а приблизительно на 0.8 от максимального значения напряжения. Это, вероятно, связано со структурой фронта возбуждающего импульса, описанной в предыдущем разделе (рис. 9). В ГНПЛ обостряется только квазилинейная часть фронта, в то время как остальная часть остается практически неизменной. Можно предположить, что для возбуждения колебаний на вершине импульса напряжения необходим почти линейный фронт по всей его длине. В рабочем

диапазоне напряжений длительность генерируемого высокочастотного импульса немонотонно увеличивалась от 2.5 до 4 нс.

Рис. 10. Осциллограммы импульса напряжения на выходе ГНПЛ (а), полученные экспериментально, и спектр импульса при напряжении 170 кВ (б).

Была получена зависимость центральной частоты генерируемого импульса от амплитуды падающего напряжения, которая представлена на рис. 11. На рис. 12 показана зависимость пиковой мощности от центральной частоты колебаний. Максимальная пиковая мощность, реализованная в эксперименте, составила 165 МВт.

Рис. 11. Зависимость центральной частоты колебаний от амплитуды напряжения падающего импульса

Рис. 12. Зависимость пиковой мощности высокочастотных колебаний от центральной частоты,

5. ИСТОЧНИК МИКРОВОЛНОВЫХ ИМПУЛЬСОВ НА ОСНОВЕ ГНПЛ

Схема экспериментальной установки источника излучения на основе ГНПЛ и ее внешний вид представлены на рис. 13. Для излучения высокочастотного импульса в открытое пространство дополнительно использовались фильтр высоких частот и комбинированная антенна.

Рис. 13. Схема источника (а) и ее внешний вид (б).

5.1. Фильтр высоких частот

В работе использовался коаксиальный фильтр высоких частот, основанный на коаксиальной линии с диаметром внешнего проводника 20 мм (рис. 14). Фильтр представляет собой коаксиальный тройник, разделяющий высокочастотную и низкочастотную составляющие импульса, вышедшего из НПЛ. Высокочастотная составляющая импульса проходит по фильтру прямо в порт 2 и подается на антенну, оставшийся видеоимпульс ответвляется в порт 3, после чего поглощается в согласованной нагрузке. Фильтр имеет рабочую полосу от 1.2 до 4 ГГц, а его S-параметры, полученные моделированием с использованием CST Studio, представлены на рис. 15.

Рис. 14. 3D-модель фильтра высоких частот.

Рис. 15. S-параметры фильтра высоких частот.

5.2. Комбинированная антенна

Известно, что импульсы, генерируемые в НПЛ, являются скорее широкополосными. Основной трудностью в проектировании антенны для такого источника является необходимость эффективного излучения энергии, сосредоточенной на фронте импульса, а также энергии

возбужденных колебаний. Для излучения сверхширокополосных импульсов хорошо подходят ТЕМ-рупорные антенны [52] и комбинированные антенны [53–55]. В рамках лабораторных исследований более предпочтительным вариантом является комбинированная антенна, поскольку ее габариты меньше, чем у ТЕМ-рупоров со сравнимым коэффициентом усиления на определенной частоте.

В работе использовалась комбинированная антенна, представленная на рис. 16. Размеры антенны составляют $7.5 \times 7.5 \times 9$ см³.

Рис. 16. Внешний вид использованной комбинированной антенны.

Антенна была оптимизирована для излучения сверхширокополосных импульсов в диапазоне частот от 1 до 4 ГГц. Зависимость коэффициента стоячей волны от частоты для данной антенны представлена на рис. 17. Диаграмма направленности антенны, полученная моделированием в CST Studio на частоте 3.4 ГГц, представлена на рис. 18. Для повышения электрической прочности антенны она помещалась в специально изготовленный диэлектрический корпус, который был заполнен SF₆ под давлением 2 атм. Диэлектрический корпус был оптимизирован таким образом, чтобы вносить минимальные изменения в характеристики антенны.

Рис. 17. Зависимость коэффициента стоячей волны комбинированной антенны от частоты.

Рис. 18. Диаграмма направленности комбинированной антенны на частоте 3.4 ГГц.

5.3. Результаты измерений

В эксперименте в качестве приемной антенны также использовалась комбинированная антенна. Осциллограмма принятого сигнала на расстоянии 1.3 м от источника представлена на рис. 19, она соответствует напряжению на входе ГНПЛ 170 кВ.

Рис. 19. Осциллограмма принятого сигнала на расстоянии 1.3 м от источника.

Пиковое значение плотности потока мощности на оси приемной и передающей антенн может быть вычислено согласно следующему соотношению:

$$P = \frac{U^2}{\rho A_{eff}}. \quad (5)$$

Здесь U – измеренное напряжение, ρ – импеданс коаксиального кабеля, A_{eff} – эффективная поверхность антенны. Эффективная поверхность приемной антенны составляет $A_{eff} \approx 43$ см², следовательно, пиковое значение плотности потока мощности составило 6.7 МВт/м². Для того чтобы определить напряженность электрического поля в точке измерения и эффективный потенциал источника, следует воспользоваться другим соотношением для определения P :

$$P = E^2 / \rho_0. \quad (6)$$

Здесь E – напряженность электрического поля в точке измерения, $\rho_0 = 377 \text{ Ом}$ – импеданс открытого пространства. Таким образом, напряженность электрического поля в точке измерения составила $E \approx 50 \text{ кВ/м}$. Это соответствует эффективному потенциалу источника 65 кВ. Энергия излученного микроволнового импульса составляет 0.2 Дж.

В ходе работы был реализован импульсно-периодический режим работы источника с частотой следования импульсов 50 Гц количеством до 2000 импульсов без признаков электрического пробоя. Ограничения на количество импульсов в одной последовательности (или, другими словами, на непрерывное время работы источника) определяются электрической схемой первичного контура трансформатора Тесла генератора SINUS-200 и отсутствием продувки рабочего газа искрового разрядника. Их перегрев при продолжительной работе приводит к нестабильности работы генератора (разбросу напряжения формируемых видеоимпульсов). Усредненная мощность излучения источника составляет 10 Вт. Средняя мощность импульсов, подаваемых на вход системы, составляла 345 Вт. Если для оценок пренебречь энергией переотраженных импульсов в силу ее малости, то средняя выделяемая мощность в нагрузке составила 300 Вт. Резистор нагрузки имел трубчатую конструкцию и был размещен в масле, что обеспечило необходимый теплоотвод во время работы источника. Максимальная напряженность электрического поля в масле линии не превышала 400 кВ/см.

6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Был разработан и протестирован твердотельный сверхширокополосный источник наносекундных высокочастотных импульсов, основанный на гофрированной НПЛ и не использующий электромагниты. В ходе работы был продемонстрирован стабильный импульсно-периодический режим работы источника с частотой следования импульсов 50 Гц в течение 40 с. Зарегистрированный экспериментально эффективный потенциал источника составил 65 кВ. Дальнейшим направлением развития является создание устройства с высокой полной энергоэффективностью и повышенной частотой следования импульсов (до нескольких сотен Гц). Отсутствие соленоидов в системе обуславливает зависимость ее эффективности от характеристик генератора наносекундных высоковольтных импульсов, ГНПЛ и системы вывода излучения. На сегодняшний день генераторы типа SINUS имеют эффективность около 70% при пересчете на потребляемую энергию от сети. Поскольку эффективность преобразования энергии видеоимпульса в высокочастотные колебания в НПЛ может достигать 10%, создание источника излучения с эффективностью 1–5% при пересчете на полную потребляемую мощность от сети представляется реальной задачей.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Данная работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (FWRM-2025-0002).

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Benford J.* // IEEE Trans. Plasma Sci. 2024. V. 52. P. 1137.
<https://doi.org/10.1109/TPS.2024.3391732> .
2. *Schamiloglu E.* // IEEE International Workshop on Technologies for Defense and Security (TechDefense), Naples, Italy. 2025. P. 430.
<https://doi.org/10.1109/TechDefense63521.2024.10863610> .
3. *Белянцев А.М., Гапонов А.В., Фрейдман Г.И.* // ЖТФ. 1965. Т. 35. № 4. С. 677.
[*Belyantsev A. M., Gaponov A. V., Freidman G. I.* // Sov. Tech. Phys. 1965. V. 10. P. 531.]
4. *Ikezi H., DeGrassie J.S., Drake J.* // Appl. Phys. Lett. 1991. V. 58. P. 986.
<https://doi.org/10.1063/1.104464> .
5. *Raimundi L.R., Rossi J.O., Rangel E.G. L. et al.* // IEEE Trans. Plasma Sci. 2019. V. 47. P. 566.
<https://doi.org/10.1109/TPS.2018.2873491> .
6. *Bragg J.-W.B., Dickens J.C., Neuber A.A.* // IEEE Trans. Plasma Sci. 2013. V. 41. P. 232.
<https://doi.org/10.1109/TPS.2012.2226169> .
7. *Seddon N., Dolan J.E., Spikings C.R.* // IEEE 34th ICOPS, Albuquerque, USA. 2007. P. 480.
<https://doi.org/10.1109/PPPS.2007.4345786> .
8. *Romanchenko I.V., Konev V.Yu., Barmin V.V. et al.* // AIP Advances. 2020. V. 10. P. 125020.
<https://doi.org/10.1063/5.0034106> .
9. *Губанов В.П., Гунин А.В., Ковальчук О.Б. Кутенков В.О., Романченко И.В., Ростов В.В.* // Письма в ЖТФ. 2009. Т. 35. № 13. С. 81. <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=20326929>
[*Gubanov V.P., Gunin A.V., Kovalchuk O.B. et al.* // Tech. Phys. Lett. 2009. V. 35. P. 626.
<https://doi.org/10.1134/S1063785009070116>]
10. *Priputnev P.V., Sobyenin R.K., Maltsev S. N. et al.* // IEEE 24th International Conference of Young Professionals in Electron Devices and Materials (EDM), Novosibirsk, RF. 2023. P. 730.
<https://doi.org/10.1109/EDM58354.2023.10225026> .
11. *Umaskulov M.R., Shunailov S.A.* // J. Appl. Phys. 2021. V. 130. P. 234905.
<https://doi.org/10.1063/5.0072352> .

12. *Andreev Yu.A., Koshelev V.I., Romanchenko I.V. et al.* // J. Commun. Technol. Electron. 2013. V. 58. P. 297. <https://doi.org/10.1134/S1064226913040025> .
13. *Romanchenko I.V., Rostov V.V., Gubanov V.P. et al.* // Rev. Sci. Instrum. 2012. V. 83. P. 074705. <https://doi.org/10.1063/1.4738641> .
14. *Cui Y., Meng J., Luo K. et al.* // Rev. Sci. Instrum. 2022. V. 93. P. 104706. <https://doi.org/10.1063/5.0102437> .
15. *Romanchenko I.V., Rostov V.V., Gunin A.V., Konev V.Yu.* // J. Appl. Phys. 2015. V. 117. P. 214907. <https://doi.org/10.1063/1.4922280> .
16. *Ulmaskulov M.R., Shunailov S.A., Sharypov K.A. et al.* // Rev. Sci. Instrum. 2019. V. 90. P. 064703. <https://doi.org/10.1063/1.5091075> .
17. *Bragg J.-W.B., Sullivan W.W., Mauch D. et al.* // Rev. Sci. Instrum. 2013. V. 84. P. 054703. <https://doi.org/10.1063/1.4804196> .
18. *Johnson J.M., Reale D.V., Krile J.T. et al.* // Rev. Sci. Instrum. 2016. V. 87. P. 054704. <https://doi.org/10.1063/1.4947230> .
19. *Dolan J.E., Bolton H.R.* // IEEE Proc. Sci. Meas. Technol. 2000. V. 147. P. 237. <https://doi.org/10.1049/ip-smt:20000447> .
20. *Афанасьев К.В., Ковальчук О.Б., Кутенков В.О., Романченко И.В., Ростов В.В.* // ПТЭ. 2008. №3. С. 86. <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=9989725>
[*Afanasyev K. V., Kovalchuk O. B., Kutenkov V. O. et al.* // IET. 2008. V. 51. P. 406. <https://doi.org/10.1134/S0020441208030135>]
21. *Dolan J.E.* // Electronics Lett. 1999. V. 35. P. 1168. <https://doi.org/10.1049/el:19990806> .
22. *Ulmaskulov M.R., Mesyats G.A., Sadykova A.G. et al.* // Rev. Sci. Instrum. 2017. V. 88. P. 045106. <https://doi.org/10.1063/1.4979641> .
23. *Patrakov V.E., Pedos M.S., Ponomarev A.V. et al.* // Rev. Sci. Instrum. 2024. V. 95. P. 084709. <https://doi.org/10.1063/5.0209990> .
24. *Seddon N.* // Proc. SPIE. 1994. V. 2343. P. 198. <https://doi.org/10.1117/12.198661> .
25. *Reale D.V., Bragg J.-W.B., Gonsalves N.R. et al.* // Rev. Sci. Instrum. 2014. V. 85. 054706. <https://doi.org/10.1063/1.4878339> .
26. *Johnson J.M., Reale D.V., Cravey W.H. et al.* // Rev. Sci. Instrum. 2015. V. 86. P. 084702. <https://doi.org/10.1063/1.4927719> .
27. *Rostov V.V., El'chaninov A.A., Klimov A.I. et al.* // IEEE Trans. Plasma Sci. 2013. V. 41. P. 2735. <https://doi.org/10.1109/TPS.2013.2270571> .

28. *Romanchenko I.V., Ulmaskulov M.R., Sharypov K.A. et al.* // Rev. Sci. Instrum. 2017. V. 88. P. 054703. <https://doi.org/10.1063/1.4983803> .
29. *Bragg W.B., Dickens J.C., Neuber A.A.* // J. Appl. Phys. 2013. V. 113. P. 064904. <https://doi.org/10.1063/1.4792214> .
30. *Chui Y., Meng J., Zhu D. et al.* // IEEE Trans. Electron. Dev. 2024. V. 71. P. 2676. <https://doi.org/10.1109/TED.2024.3370127> .
31. *Ulmaskulov M.R., Shunailov S.A., Oganesyana A., Ovchinnikova L.* // IEEE Microwave Wireless Technol. Lett. 2023. V. 33. P. 1147. <https://doi.org/10.1109/LMWT.2023.3276479> .
32. *Bragg J., Dickens J., Neuber A.* // Proc. IEEE Int. Power Modulator High Voltage Conf., Atlanta, USA. 2010. P. 600. <https://doi.org/10.1109/IPMHVC.2010.5958430> .
33. *Rossi J.O., Yamasaki F.S., Barroso J.J. et al.* // IEEE Int. Power Modulator High Voltage Conf. (IPMHVC), Knoxville, USA. 2022. <https://doi.org/10.1109/IPMHVC51093.2022.10099397> .
34. *Priputnev P.V., Romanchenko I.V., Maltsev S.N. et al.* // Rev. Sci. Instrum. 2023. V. 94. P. 054708. <https://doi.org/10.1063/5.0144386> .
35. *Konev V.Yu., Priputnev P.V., Sobyenin R.K. et al.* // Tech. Phys. Lett. 2024. V. 50. P. 59. <https://doi.org/10.61011/TPL.2024.07.58730.19868> .
36. *Катаев И.Г.* Ударные электромагнитные волны. Москва: Сов. радио, 1963.
37. *Weiner M., Silber L.* // IEEE Trans. Magn. 1981. V. 17. P. 1472. <https://doi.org/10.1109/TMAG.1981.1061243> .
38. *Гапонов А.В., Островский Л.А., Фрейдман Г.И.* // Изв. вузов. Радиофизика. 1967. Т. 10. С. 1376.
39. *Dolan J.E., Bolton H.R., Shapland A.J.* // Electron. Lett. 1997. V. 33. P. 2049. <https://doi.org/10.1049/el:19971395> .
40. *Belyantsev A. M., Dubnev A. I., Klimin S. L. et al.* // Tech. Phys. 1995. V. 40. P. 820.
41. *Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М.* // Phys. Zs. Sowjet. 1935. Т. 8. С. 153.
[*Landau L., Lifshitz E.* // Sov. Phys. 1935. V. 2. P. 153.]
42. *Stöhr J., Siegmann H.C.* Magnetism. From Fundamentals to Nanoscale Dynamics. Springer SSSOL. V. 152. 2006. <https://doi.org/10.1007/978-3-540-30283-4>
43. *Gilbert T.L.* // IEEE Trans. Magn. 2004. V. 40. P. 3443. <https://doi.org/10.1109/TMAG.2004.836740>.
44. *Patrakov V.E.* // IEEE Trans. Plasma Sci. 2025. V. 53. P. 1531. <https://doi.org/10.1109/TPS.2025.3574027> .
45. CST STUDIO SUITE©, CST Computer Simulation Technology AG. <https://www.cst.com> .

46. *Greco A.F.G., Rossi J.O., Barroso J.J. et al. // Rev. Sci. Instrum. 2022. V. 93. 065101. <https://doi.org/10.1063/5.0087452> .*
47. *Cui Y., Meng J., Huang L. et al. // Rev. Sci. Instrum. 2021. V. 92. 034702. <https://doi.org/10.1063/5.0040323> .*
48. *Denny B., Garrett T., Schrock J. // IEEE International Symposium on Antennas and Propagation and USNC-URSI Radio Science Meeting (USNC-URSI), Portland, OR, USA. 2023. <https://doi.org/10.1109/USNC-URSI52151.2023.10237742> .*
49. *Deng G., Huang W., Wang X. et al. // IEEE Trans. Plasma Sci. 2023. V. 51. P. 2632. <https://doi.org/10.1109/TPS.2023.3309660> .*
50. *Priputnev P.V., Romanchenko I.V., Tarakanov V.P., Pegel I.V. // 7th International Congress on Energy Fluxes and Radiation Effects (EFRE), Tomsk, RF. 2020. <https://doi.org/10.1109/EFRE47760.2020.9241904> .*
51. *Mesyats G.A., Korovin S.D., Gunin A.V. et al. // Laser Part. Beams. 2003. V. 21. P. 197. <https://doi.org/10.1017/s0263034603212076> .*
52. *Karshenas F., Mallahzadeh A.R., Imani A. // 13th International Symposium on Antenna Technology and Applied Electromagnetics and the Canadian Radio Science Meeting, Banff, Canada. 2009. P. 1. <https://doi.org/10.1109/ANTEMURSI.2009.4805077> .*
53. *Andreev Yu.A., Gubanov V.P., Efremov A.M. et al. // Laser Part. Beams. 2003. V. 21. P. 211. <https://doi.org/10.1017/S0263034603212088> .*
54. *Godard A., Desrumaux L., Bertrand V. et al. // Int. J. Antennas Propag. 2010. P. 243145. <https://doi.org/10.1155/2010/243145> .*
55. *Wang S., Xie Y., Qiu Y. // Rev. Sci. Instrum. 2021. V. 92. P. 074701. <https://doi.org/10.1063/5.0045655> .*

ПОДПИСИ К РИСУНКАМ

- Рис. 1.** Коаксиальная НПЛ с однородным ферритовым заполнением.
- Рис. 2.** Гофрированная НПЛ.
- Рис. 3.** Схема замещения ГНПЛ: C и L – емкость и индуктивность одного периода линии, C^* – емкость между соседними ячейками линии.
- Рис. 4.** Дисперсионные кривые разработанной ГНПЛ: синяя кривая – расчет по формуле (2), красная – полученная в результате моделирования.
- Рис. 5.** Импульс напряжения на выходе ГНПЛ (**а**) и его спектр (**б**), полученные численным моделированием.
- Рис. 6.** Зависимость центральной частоты генерации ГНПЛ от аксиального магнитного поля, полученная моделированием.
- Рис. 7.** Зависимость центральной частоты генерации ГНПЛ от напряжения при аксиальном поле 49 кА/м, полученная моделированием.
- Рис. 8.** Схема эксперимента с резистивной нагрузкой.
- Рис. 9.** Осциллограммы изначального (синий) и обостренного (красный) импульсов напряжения. Маркеры соответствуют 10%, 80% и 90% длительности фронта.
- Рис. 10.** Осциллограммы импульса напряжения на выходе ГНПЛ (**а**), полученные экспериментально, и спектр импульса при напряжении 170 кВ (**б**).
- Рис. 11.** Зависимость центральной частоты колебаний от амплитуды напряжения падающего импульса, полученная экспериментально.
- Рис. 12.** Зависимость пиковой мощности высокочастотных колебаний от центральной частоты, полученная экспериментально.
- Рис. 13.** Схема источника (**а**) и ее внешний вид (**б**).
- Рис. 14.** 3D-модель фильтра высоких частот.
- Рис. 15.** S-параметры фильтра высоких частот.
- Рис. 16.** Внешний вид использованной комбинированной антенны.
- Рис. 17.** Зависимость коэффициента стоячей волны комбинированной антенны от частоты.
- Рис. 18.** Диаграмма направленности комбинированной антенны на частоте 3.4 ГГц.
- Рис. 19.** Осциллограмма принятого сигнала на расстоянии 1.3 м от источника.

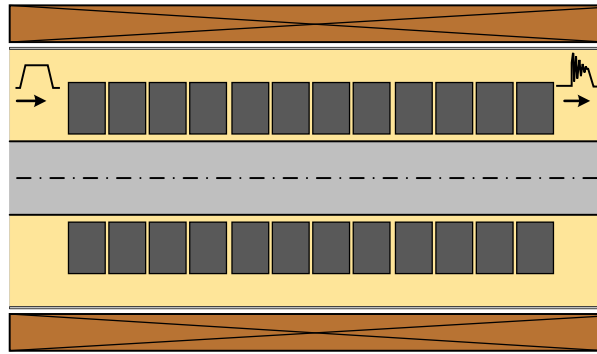


Рис.1

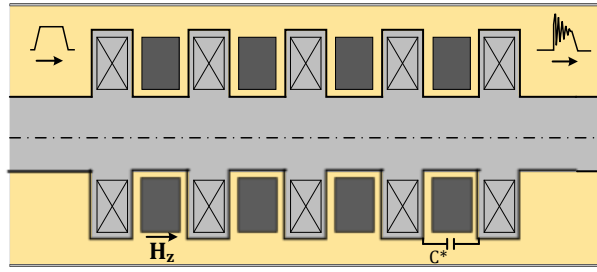


Рис. 2

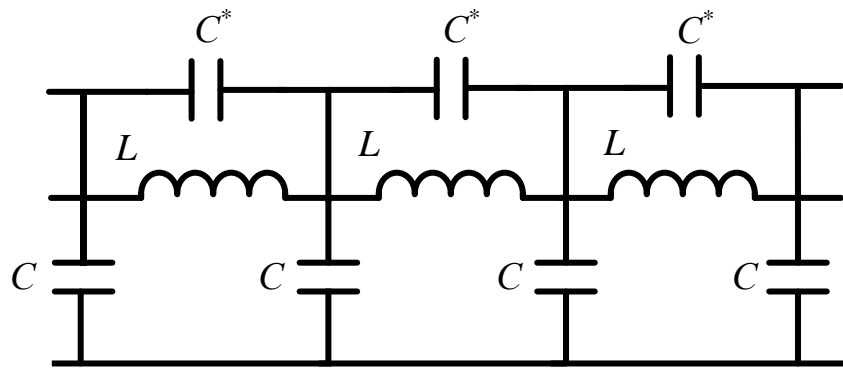


Рис. 3

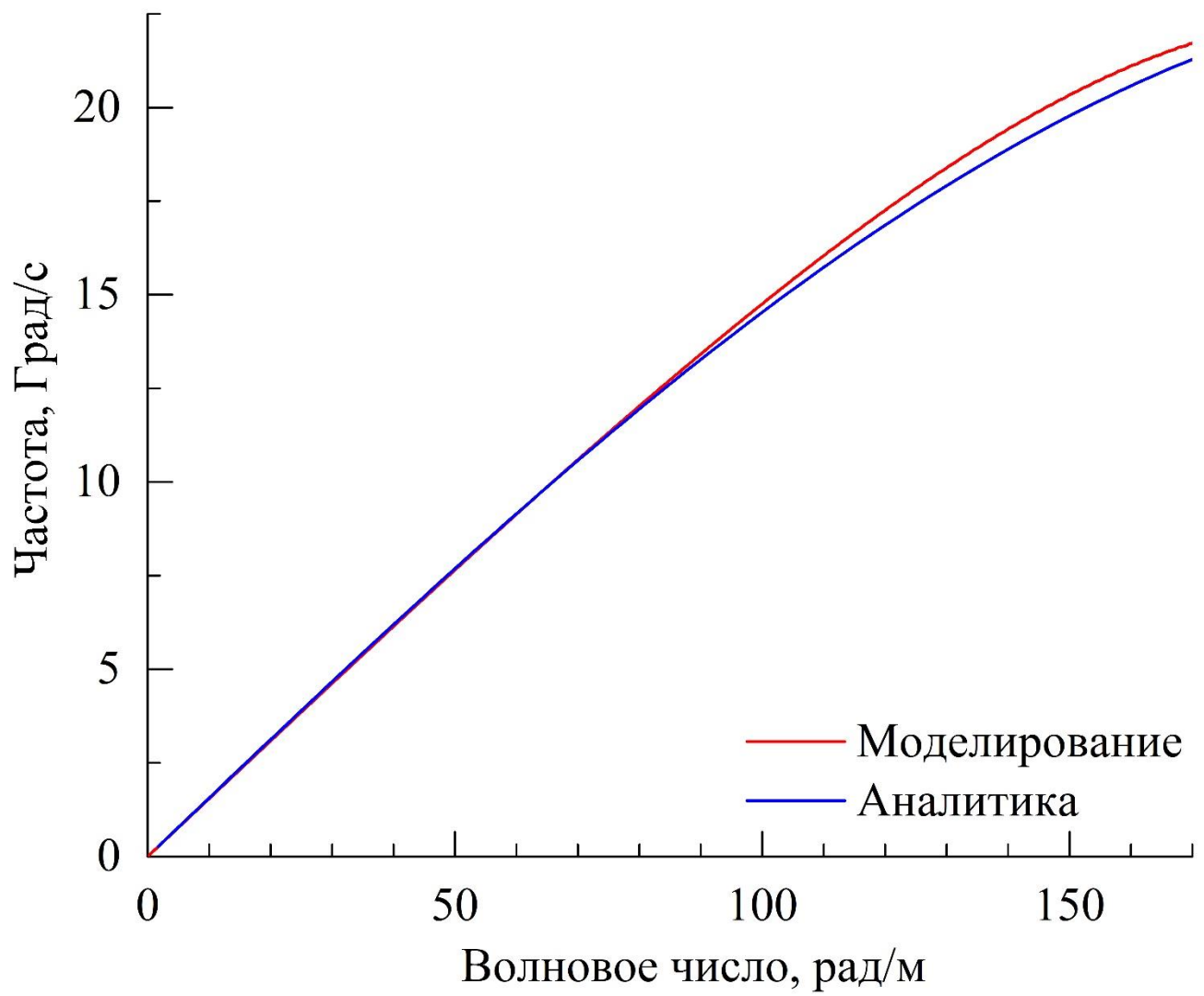


Рис. 4

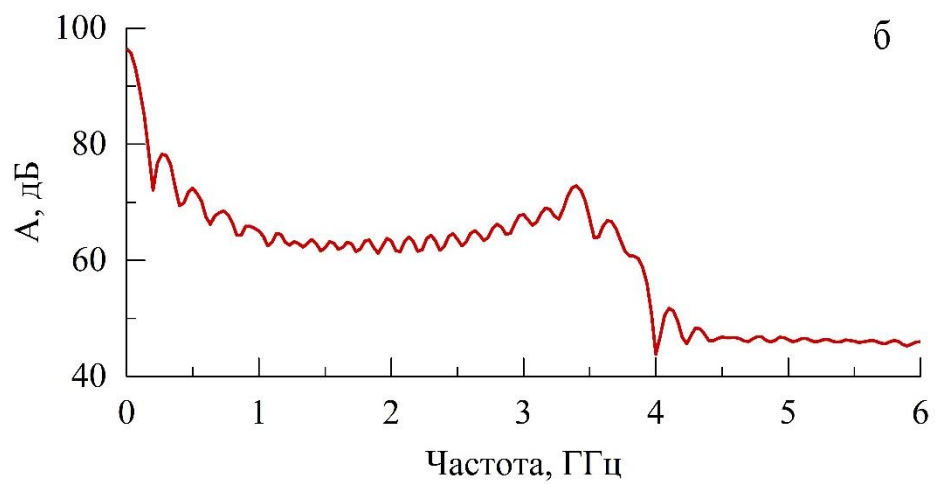
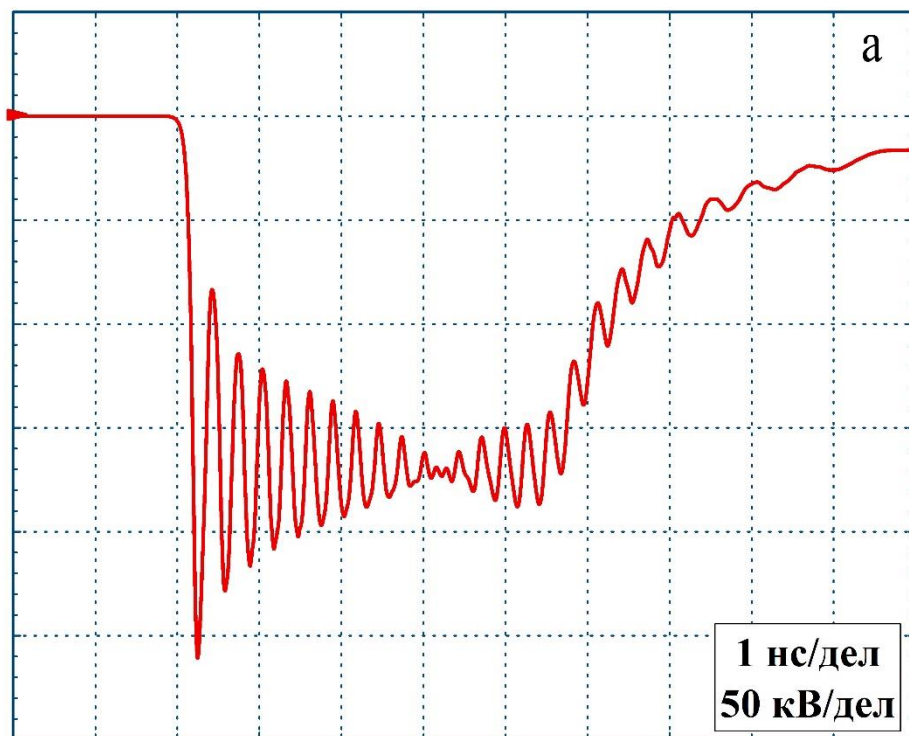


Рис. 5

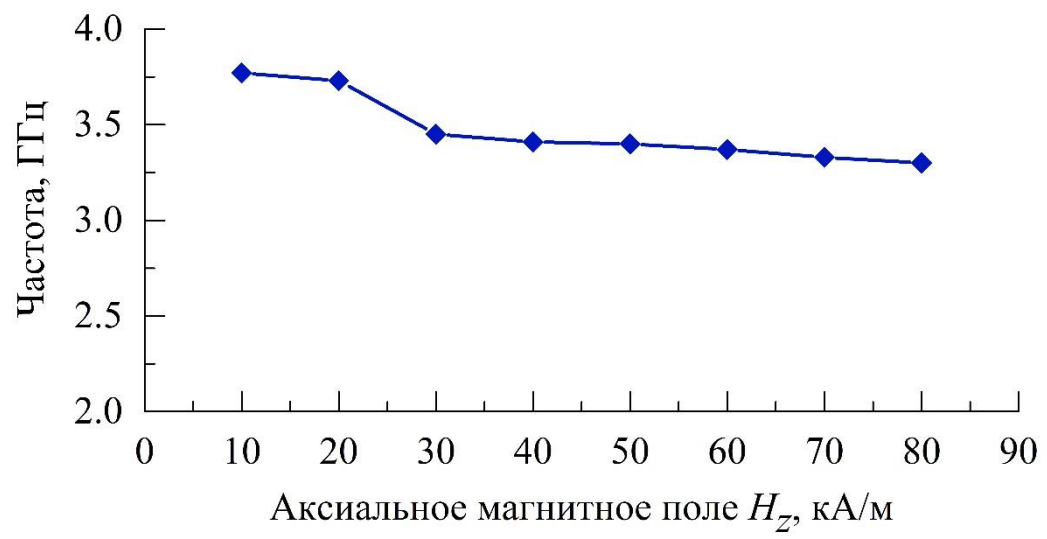


Рис. 6

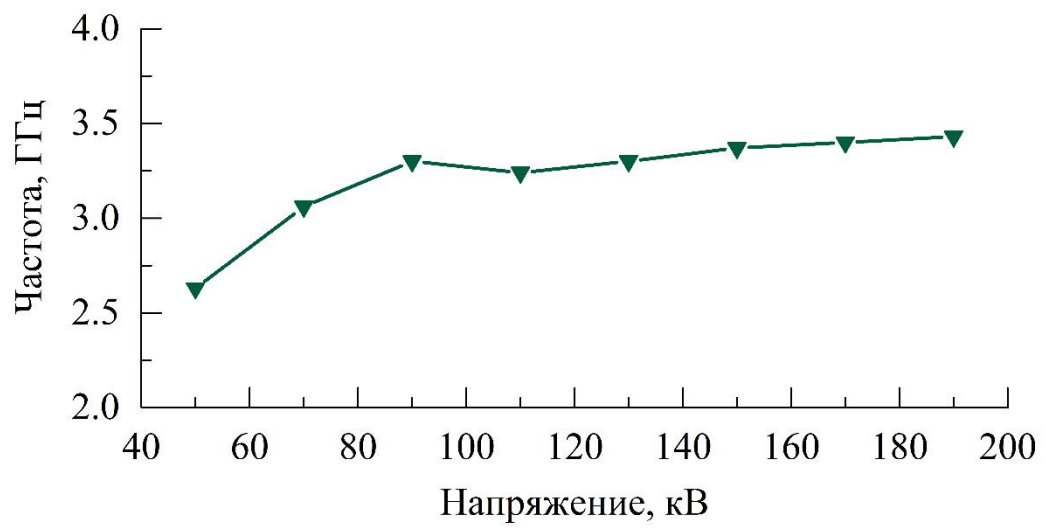


Рис. 7

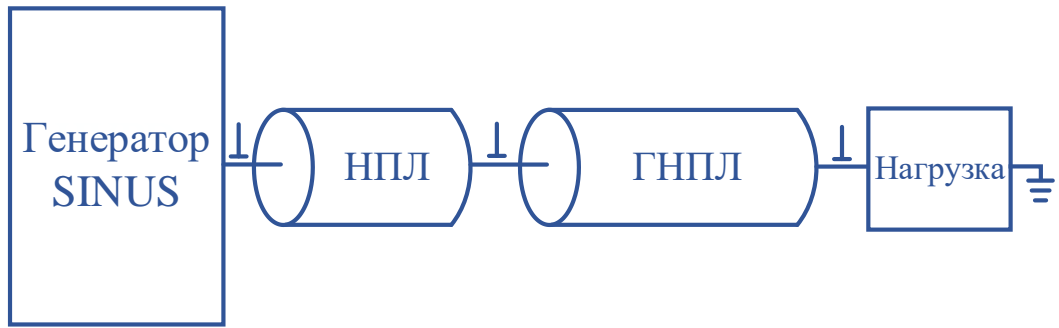


Рис. 8

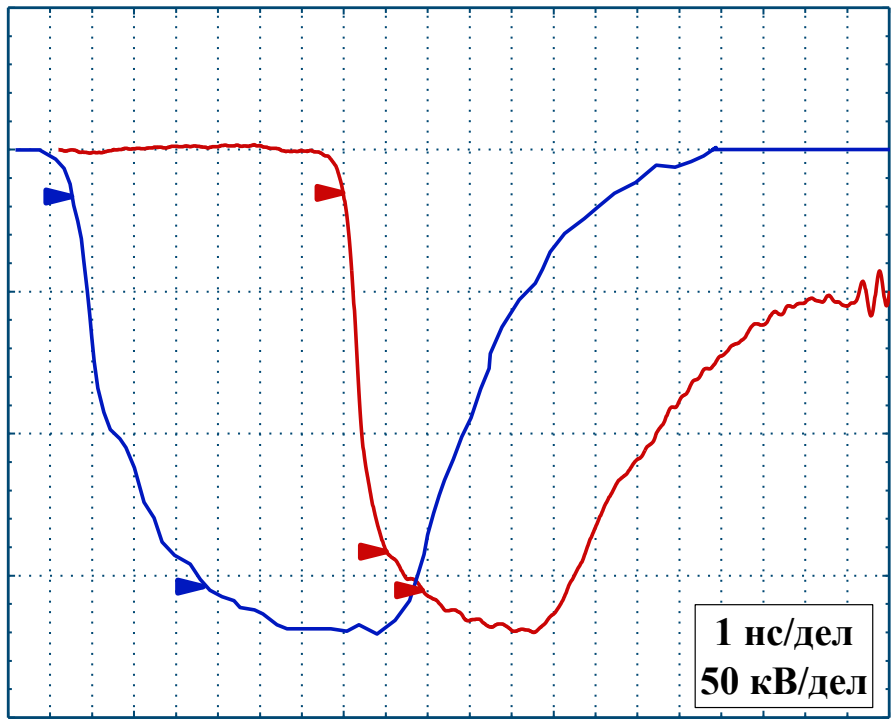


Рис. 9

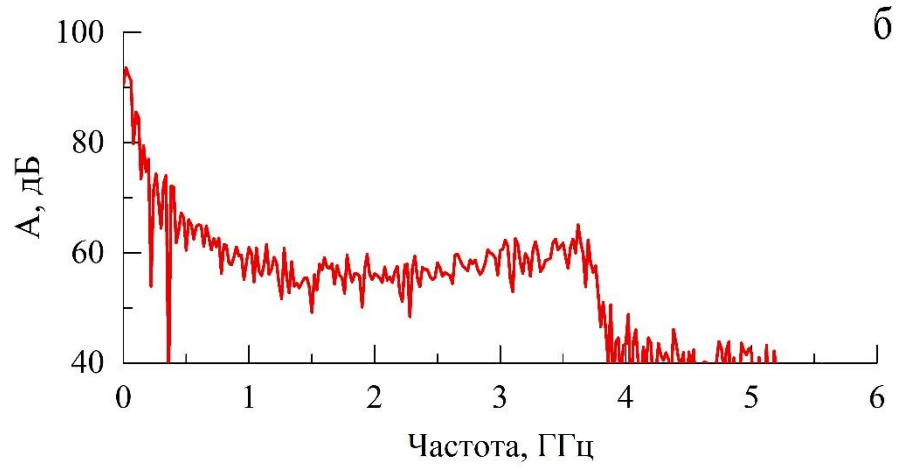
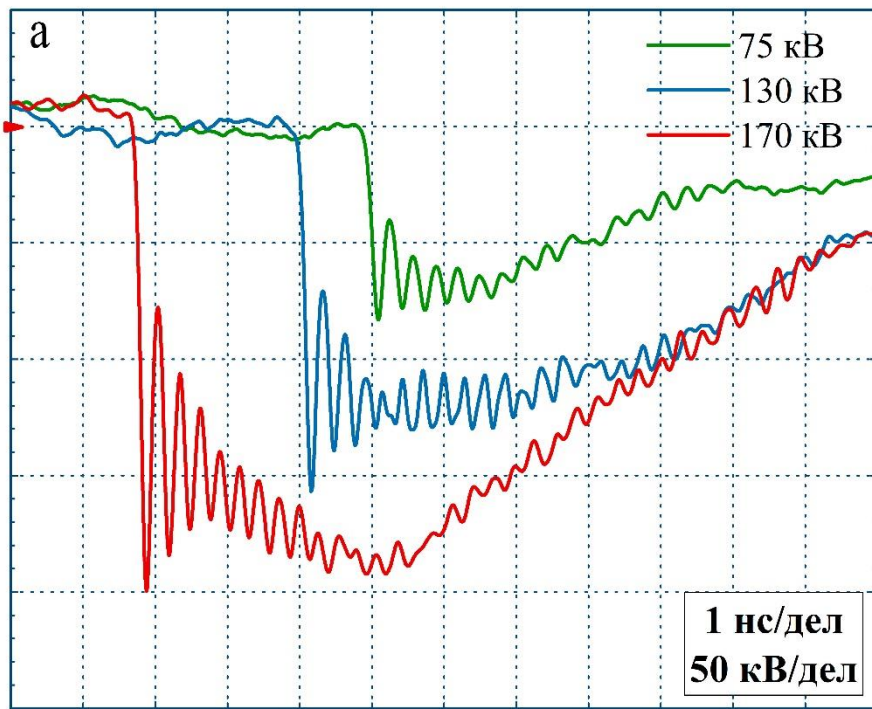


Рис. 10

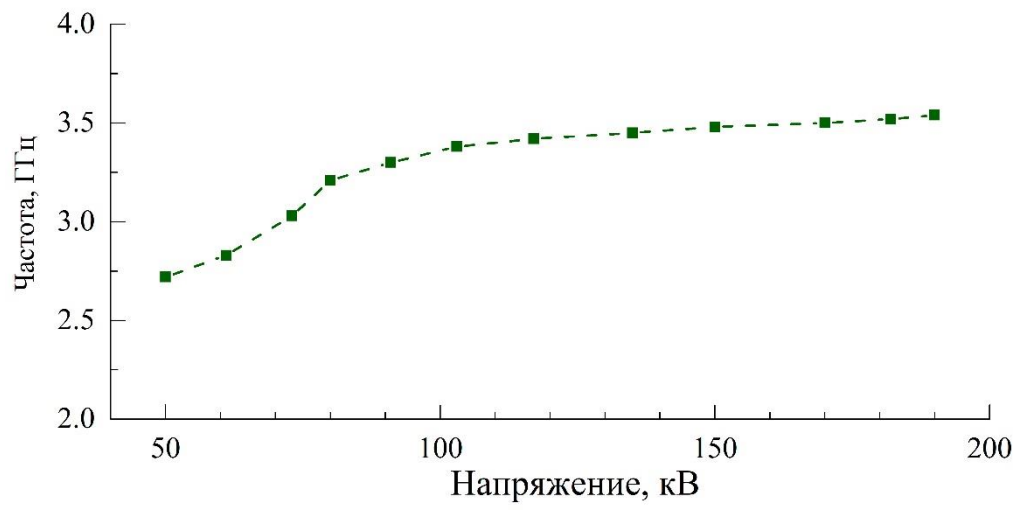


Рис. 11

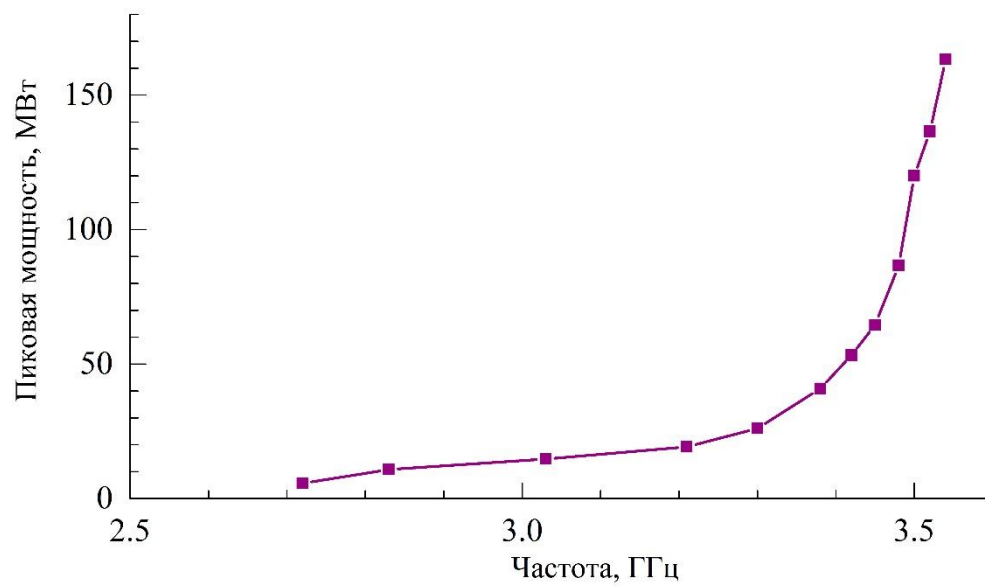


Рис. 12

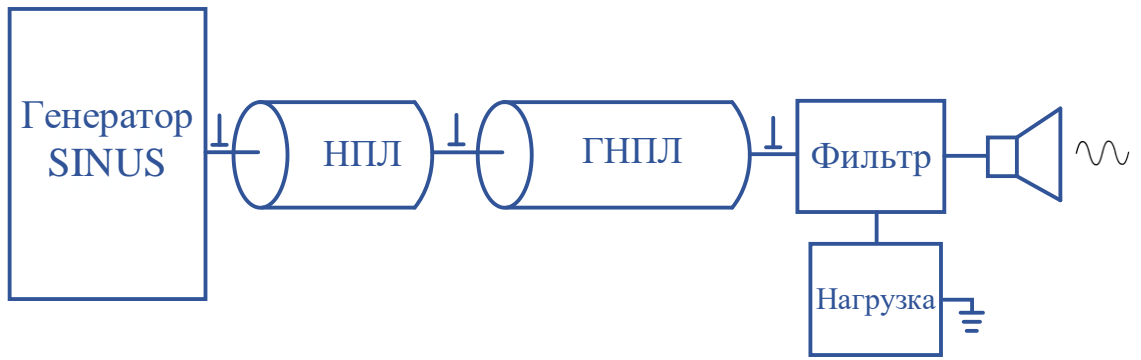


Рис. 13

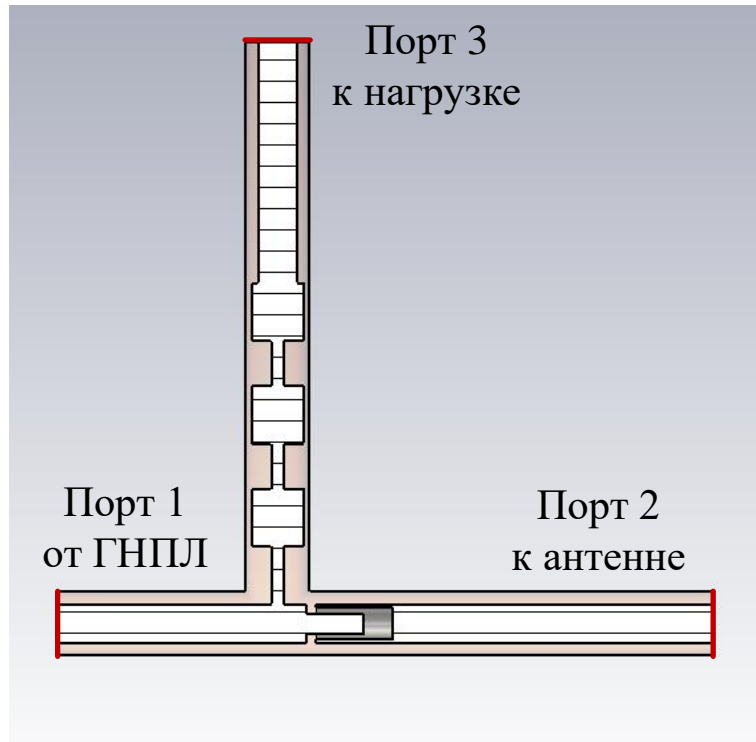


Рис. 14

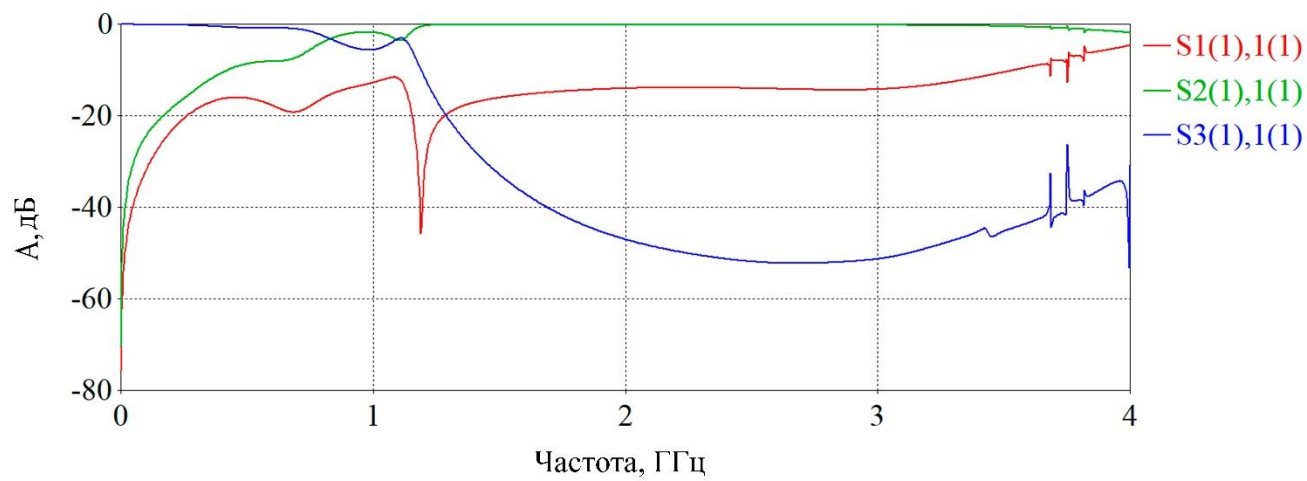


Рис. 15

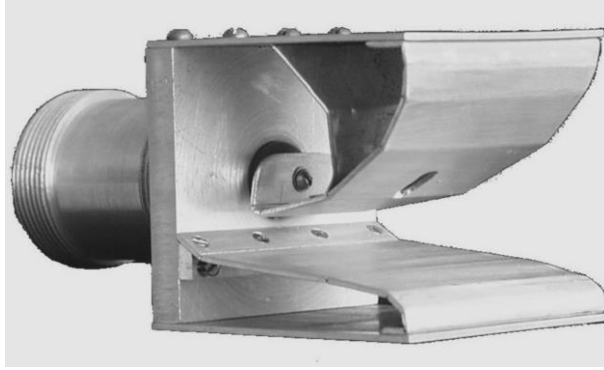


Рис. 16

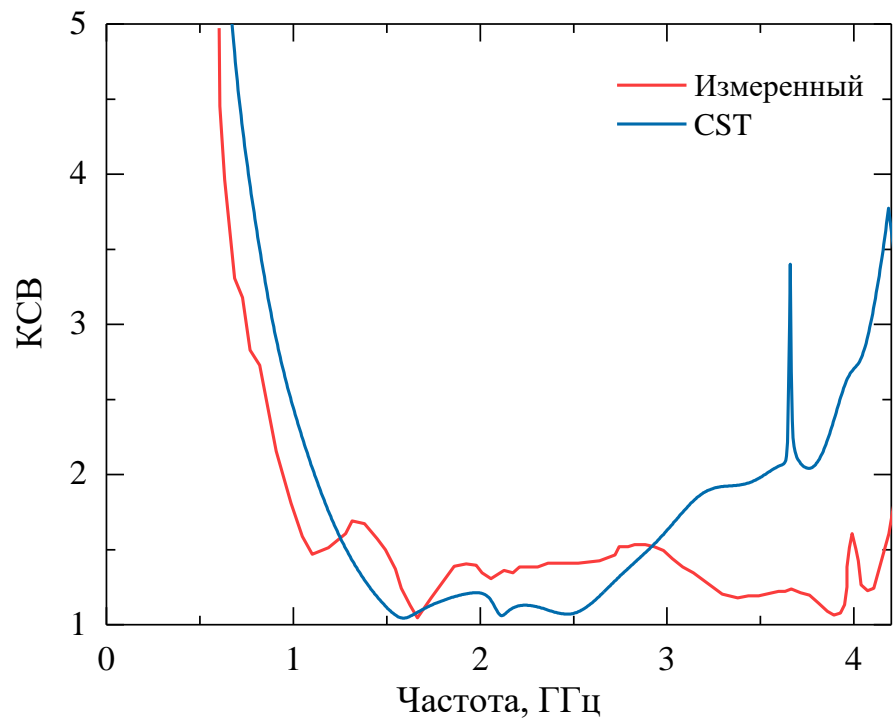


Рис. 17

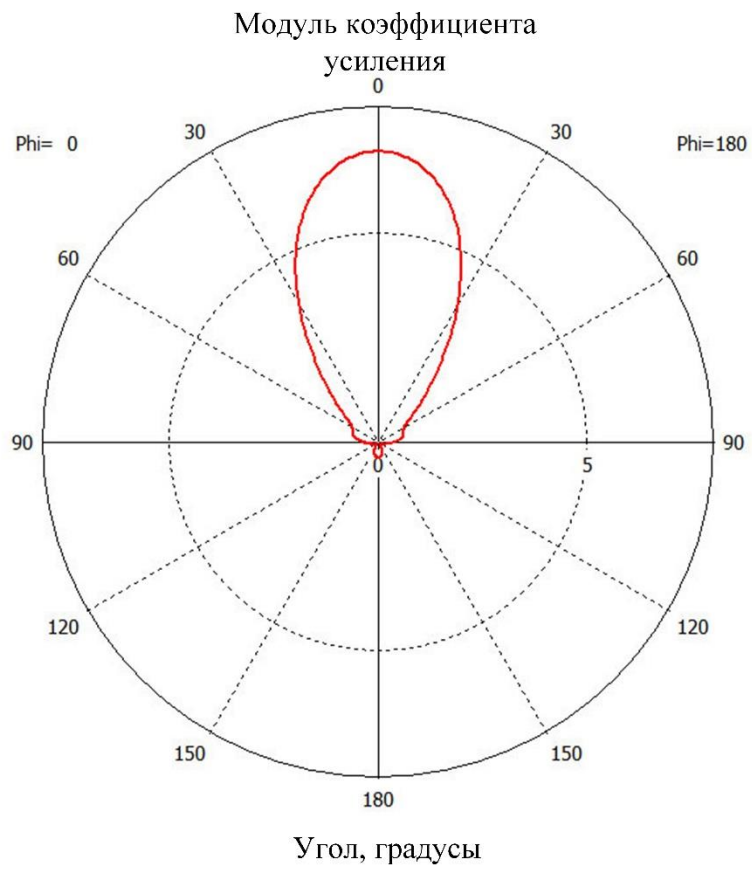


Рис. 18

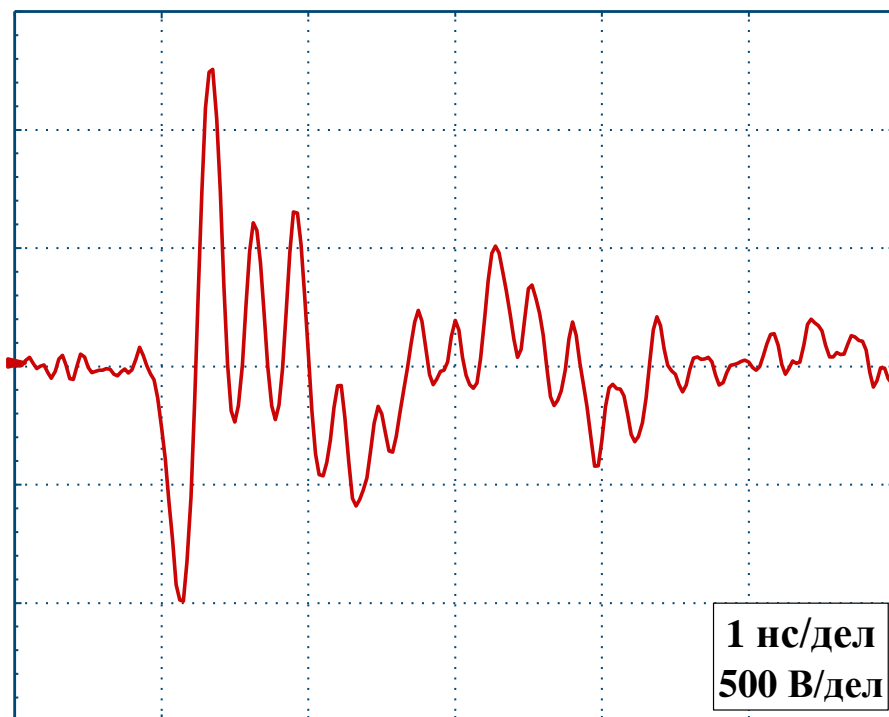


Рис. 19