

11.2;13.4

## Повышение эффективности преобразования энергии высоковольтного импульса в энергию радиоимпульса нелинейной передающей линии в схеме с его повторным использованием для возбуждения высокочастотных колебаний

© В.Ю. Конев, П.В. Припутнев, Р.К. Собянин, И.В. Романченко, П.В. Выходцев

Институт сильноточной электроники СО РАН, Томск, Россия  
E-mail: konev@lnes.hcei.tsc.ru

Поступило в Редакцию 19 января 2024 г.

В окончательной редакции 15 марта 2024 г.

Принято к публикации 29 марта 2024 г.

Реализован способ генерации двух импульсов СВЧ-излучения с использованием нелинейных передающих линий с насыщенным ферритом при их последовательном возбуждении одним высоковольтным импульсом. Использование энергии одного видеоимпульса для возбуждения колебаний в двух нелинейных передающих линиях позволяет увеличить эффективность преобразования его энергии в энергию высокочастотных колебаний до двух раз. Данная схема генерации может быть использована для реализации излучения последовательности СВЧ-импульсов с частотой следования в десятки мегагерц.

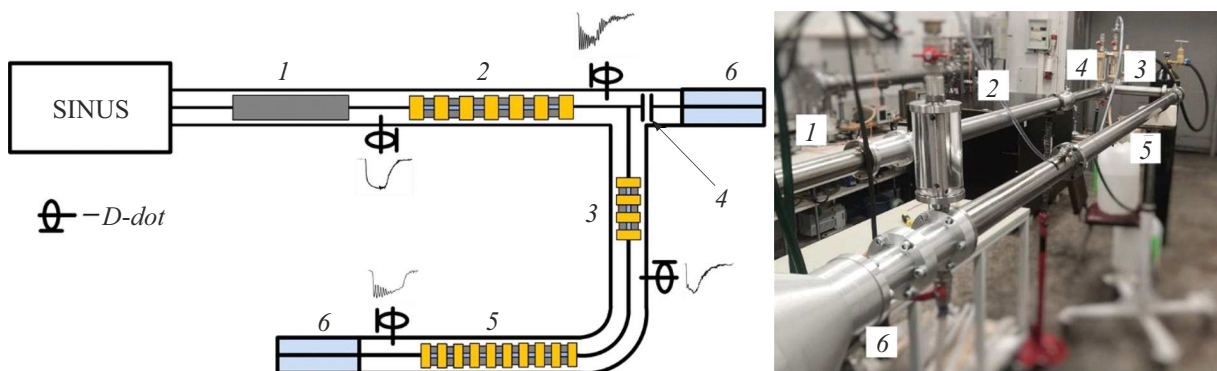
**Ключевые слова:** нелинейные передающие линии, последовательность СВЧ-импульсов, высокая эффективность, высокая частота следования импульсов.

DOI: 10.61011/PJTF.2024.14.58303.19868

Развитие способов генерации наносекундных импульсов СВЧ-излучения с амплитудой пиковой мощности, превышающей 100 MW, является актуальным направлением в области сильноточной электроники по сей день [1]. Одной из наиболее важных задач при разработке устройств мощной СВЧ-электроники является увеличение энергетической эффективности [2]. Генераторы мощных наносекундных СВЧ-импульсов можно условно разделить на две группы. Первая группа — это генераторы, использующие потоки свободных электронов [3,4]. Для таких генераторов характерны субгигаваттные и гигаваттные уровни пиковой мощности и, как правило, узкополосный спектр генерируемого излучения. Из основных особенностей генераторов с электронным пучком можно выделить то, что для их работы требуются высокий вакуум и создание сильных магнитных полей для транспортировки пучка, а также зачастую защита от сопутствующего рентгеновского излучения. Альтернативой (вторая группа) являются устройства без электронных пучков: сверхширокополосные системы и нелинейные передающие линии (НПЛ). К устройствам мощной СВЧ-электроники относятся НПЛ с насыщенным ферритом, спектр излучения которых является широкополосным, а их мощностные характеристики составляют сотни мегаватт в дециметровом диапазоне длин волн [5]. Традиционные источники широкополосного излучения основаны на другом подходе, в котором широкополосная антенна возбуждается монополярным или биполярным импульсом напряжения длительностью в несколько наносекунд [6,7].

Использование генераторов на основе НПЛ в источниках широкополосных импульсов сегодня видится перспективным, поскольку в отличие от традиционных СВЧ-приборов, использующих электронный пучок, генераторы на основе НПЛ могут быть полностью твердотельными. Полная энергоэффективность источников наносекундного СВЧ-излучения складывается из следующих факторов: эффективность формирования высоковольтных импульсов, энергия, необходимая для создания сильных магнитных полей, эффективность преобразования энергии высоковольтного импульса в энергию СВЧ-импульса, потери на излучение. Сегодня для НПЛ не требуются дополнительные источники питания для создания необходимых магнитных полей, поскольку недавно была успешно реализована схема возбуждения высокочастотных колебаний в передающей линии с насыщенным ферритом, использующая постоянные магниты вместо внешнего соленоида [8,9]. Переход к использованию постоянных магнитов существенно улучшает массогабаритные характеристики генераторов, а также повышает их полную энергоэффективность.

Энергетическая эффективность при преобразовании энергии импульса напряжения в высокочастотные колебания в НПЛ не превышает 10% для оптимальных режимов работы генераторов. Существует ряд физических ограничений на энергию генерируемого СВЧ-импульса. Теоретические оценки показывают, что максимальная амплитуда колебаний ограничена процессами, происходящими при импульсном перемагничивании насыщенного феррита [10]. Наличие дисперсионных и диссипативных свойств линии передачи, которые приводят



**Рис. 1.** Экспериментальная установка с двумя НПЛ. 1 — обостритель фронта импульса напряжения на основе отрезка НПЛ с однородным ферритовым заполнением, 2 — НПЛ № 1 с гофрированным центральным проводником, 3 — фильтр низких частот, 4 — фильтр высоких частот, 5 — НПЛ № 2 с гофрированным центральным проводником, 6 — согласованная коаксиальная широкополосная нагрузка.

к расплыванию волнового пакета на длинах порядка одного метра, препятствует дальнейшему нарастанию пиковой мощности высокочастотных колебаний. С точки зрения экспериментов наличие диэлектрических потерь в ферритах накладывает дополнительные ограничения на оптимальную длину генераторов на основе НПЛ с ферритом.

Повышение энергетического КПД генераторов на основе НПЛ с ферритом может быть достигнуто при подборе оптимальной длительности высоковольтного импульса напряжения, возбуждающего высокочастотные колебания. В том случае, когда длительность высоковольтного импульса меньше длительности возбуждаемых колебаний, а его форма не имеет участка постоянного напряжения на вершине, в экспериментах наблюдается уменьшение эффективности генерируемых радиоимпульсов [11,12]. Использование микроволновых ферритов и ферритов, разработанных специально для НПЛ, также может заметно повысить энергоэффективность процесса генерации [13–15]. В настоящей работе представлены результаты разработки схемы генерации СВЧ-импульсов в НПЛ с насыщенным ферритом, позволяющей повысить эффективность преобразования энергии импульса напряжения в высокочастотные колебания при повторном использовании падающего импульса напряжения для возбуждения другой НПЛ.

Импульс напряжения на выходе НПЛ представляет собой видеоимпульс, промодулированный высокочастотными колебаниями с частотой в единицы гигагерц. Для того чтобы излучить высокочастотный импульс после НПЛ в открытое пространство, перед широкополосной антенной обычно используются специальные тройники, включающие в себя фильтры высокой и низкой частоты, а также согласованную резистивную нагрузку. Высокочастотная составляющая импульса напряжения проходит в ту часть тройника, где располагается фильтр высоких частот, представляющий собой емкостной элемент, и затем излучается антенной. Оставшаяся часть импульса,

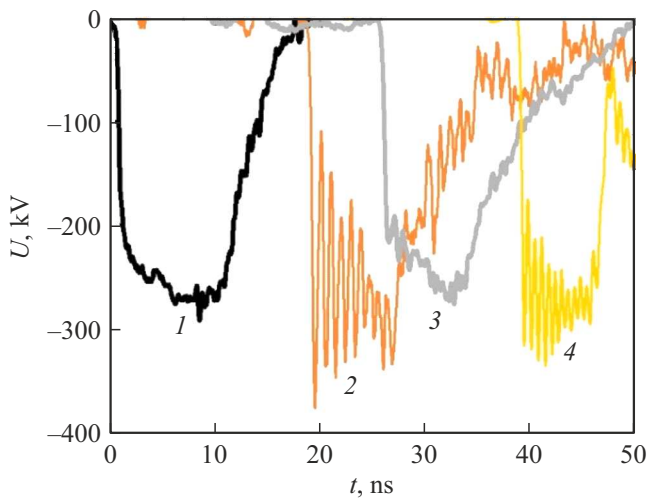
представляющая собой видеоимпульс, проходит в ту часть тройника, где располагается фильтр низких частот и поглощается в нагрузку. Как правило, в оставшемся видеоимпульсе сохраняется как минимум половина от изначальной энергии импульса.

В настоящей работе реализована схема, в которой оставшаяся часть видеоимпульса используется для возбуждения высокочастотных колебаний в другой НПЛ с насыщенным ферритом, которая располагается сразу после фильтра высоких частот.

Для генерации высокочастотных импульсов использовались нелинейные передающие линии с ферритом и постоянными магнитами, внутренний проводник которых представлял собой гофрированную структуру. Возбуждение высокочастотных колебаний в линии происходит при распространении субнаносекундного ударного фронта в линии передачи, обладающей дисперсионными свойствами. В случае гофрированной геометрии НПЛ, дисперсионные свойства определяются дискретностью структуры внутреннего проводника и наличием емкостной связи между соседними ячейками передающей линии. Подробнее с технологией НПЛ с гофрированным внутренним проводником можно ознакомиться в работах [8,9].

Схема экспериментальной установки с двумя НПЛ представлена на рис. 1.

Высоковольтный импульс от генератора типа SINUS [16] обостряется в НПЛ с однородным ферритовым заполнением, при этом фронт высоковольтного импульса укорачивается с 3 до 1 ns. После обострения импульс напряжения попадает в НПЛ № 1. Высокочастотная составляющая импульса на выходе НПЛ № 1 проходит фильтр 4 и поглощается в согласованной нагрузке 6. Оставшаяся часть видеоимпульса подается в НПЛ № 2 через фильтр 3. Промодулированный высоковольтный импульс на выходе второй нелинейной передающей линии полностью поглощается в согласованной нагрузке. Конструкция коаксиальной широкополосной



**Рис. 2.** Импульсы напряжения в порядке следования по системе гиромагнитных линий. 1 — импульс напряжения после обострения на входе НПЛ № 1; 2 — импульс напряжения на выходе НПЛ № 1; 3 — импульс напряжения на выходе фильтра низких частот; 4 — импульс напряжения на выходе НПЛ № 2.

нагрузки подробно описана в [17]. В настоящей работе в качестве НПЛ, генерирующих высокочастотные импульсы, использовались две разные НПЛ импедансом  $30 \Omega$ , работающие в разных диапазонах частот генерации: НПЛ № 1 — в диапазоне  $0.7\text{--}1.1 \text{ GHz}$ , НПЛ № 2 — в диапазоне  $1.25\text{--}1.7 \text{ GHz}$ . Подробно эти нелинейные передающие линии описаны в [9]. Вместе с фильтром низких частот 3 располагался отрезок гофрированной НПЛ, дополнительно обостряющей фронт оставшейся части видеопульса. Регистрация импульсов напряжения в эксперименте производилась с помощью датчиков  $D\text{-dot}$ , их расположение отмечено на рис 1.

Зарегистрированные импульсы в порядке следования по системе гиромагнитных линий показаны на рис. 2 для

амплитуды падающего импульса напряжения  $\sim 290 \text{ kV}$ . Задержка между импульсами определяется электрической длиной участков коаксиальной линии между точками регистрации.

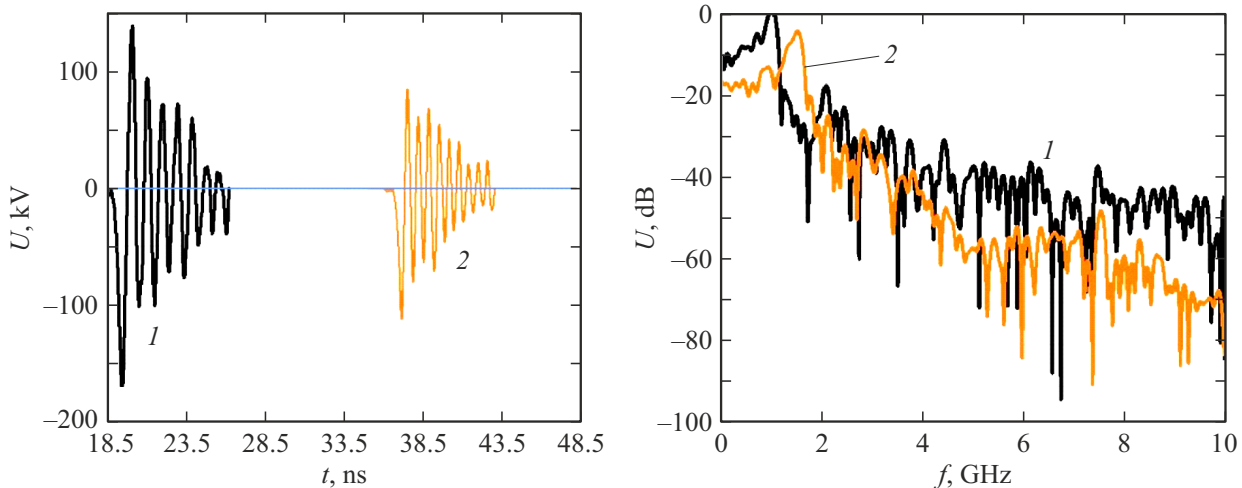
На срез импульса 2 накладываются отражения от фильтра высоких частот, поскольку этот участок не удалось хорошо согласовать, при этом указанные отражения не накладываются на основной высокочастотный импульс за счет временной развязки в схеме измерения. Временная развязка в эксперименте позволяла регистрировать импульс длительностью до  $8 \text{ ns}$  без наложения отражений.

В работе не регистрировались непосредственно СВЧ-импульсы после фильтра в силу особенностей схемы эксперимента. Отфильтрованные цифровым фильтром СВЧ-импульсы (импульсы 2 и 4 на рис. 2) и их спектры изображены на рис. 3.

Максимальная эффективность работы системы наблюдалась при напряжении падающего импульса  $\sim 290 \text{ kV}$ . Дальнейшее увеличение напряжения ограничивалось электрической прочностью системы. Расчетная энергия высокочастотных колебаний импульса 1 составила  $1.1 \text{ J}$ , а импульса 2 —  $0.25 \text{ J}$ . При этом энергия импульса напряжения, падающего на гиромагнитную линию № 1, составляла  $27.5 \text{ J}$ . Отсюда следует, что энергетический КПД гиромагнитной линии № 1 равняется  $4\%$ , а двух последовательно включенных линий —  $4.9\%$ .

Следует отметить, что эффективность преобразования энергии одной линии мала ввиду того, что изначально в эксперименте используется импульс избыточной длительности. Результаты эксперимента показали, что после генерации СВЧ-импульса в НПЛ № 1 длительность импульса напряжения сокращается на  $4 \text{ ns}$  и сам импульс теряет энергию около  $10 \text{ J}$ .

Практическое применение данной схемы может быть реализовано, когда в схеме вместо нагрузок используются антенны для излучения СВЧ-импульсов в открытое



**Рис. 3.** Радиочастотные импульсы в порядке следования по системе при напряжении падающего импульса  $293 \text{ kV}$  и их спектры. 1 — импульс НПЛ № 1; 2 — импульс НПЛ № 2.

пространство. Количество НПЛ может быть увеличено, оно определяется длительностью изначального импульса напряжения и той длиной импульса, которая теряется в результате генерации высокочастотных импульсов в одной НПЛ. В схеме могут быть использованы как одинаковые НПЛ, так и НПЛ, работающие на разных частотах. Результатом работы такой схемы станет излучение короткой последовательности высокочастотных импульсов (три-пять импульсов) с оценочной частотой следования 50 МГц.

Впервые предложена схема увеличения эффективности преобразования энергии видеоимпульса в энергию СВЧ-импульсов с повторным использованием энергии постоянной составляющей импульса на выходе нелинейной передающей линии. В работе продемонстрирована работоспособность данной схемы. Экспериментально получено увеличение эффективности с 4 до 5%. При использовании двух одинаковых НПЛ в схеме эта величина может быть выше. Результатом развития схемы может стать реализация источника короткой последовательности высокочастотных импульсов с частотой следования импульсов примерно 50 МГц.

#### Финансирование работы

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект № 22-79-10199).

#### Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

#### Список литературы

- [1] J. Benford, J.A. Swegle, E. Schamiloglu, *High power microwaves* (Taylor & Francis Group, Oxford, 2016).
- [2] J. Krile, M. Kristiansen, in *2011 IEEE Pulsed Power Conf.* (IEEE, 2011), p. 679–683. DOI: 10.1109/PPC.2011.6191562
- [3] M. Fuks, E. Schamiloglu, *Phys. Rev. Lett.*, **95** (20), 205101 (2005). DOI: 10.1103/PhysRevLett.95.205101
- [4] Е.М. Тотменинов, В.Ю. Конев, А.И. Климов, И.В. Пегель, *Письма в ЖЭТФ*, **115** (8), 479 (2022). DOI: 10.31857/S1234567822080031 [Е.М. Totmeninov, V.Yu. Konev, A.I. Klimov, I.V. Pegel, *JETP Lett.*, **115** (8), 444 (2022). DOI: 10.1134/S0021364022100356].
- [5] В.П. Губанов, А.В. Гунин, О.Б. Ковальчук, В.О. Кутенков, И.В. Романченко, В.В. Ростов, *Письма в ЖТФ*, **35** (13), 81 (2009). [V.P. Gubanov, A.V. Gunin, O.B. Koval'chuk, V.O. Kutenkov, I.V. Romanchenko, V.V. Rostov, *Tech. Phys. Lett.*, **35** (7), 626 (2009). DOI: 10.1134/S1063785009070116].
- [6] V.M. Efanov, M.V. Efanov, A.V. Kricklenko, P.V. Yarin, in *28th Int. Conf. on phenomena in ionized gases (ICPIG)* (Prague, Czech Republic, 2007), p. 1515.
- [7] Yu.A. Andreev, A.M. Efremov, V.I. Koshelev, B.M. Kovalchuk, A.A. Petkun, K.N. Sukhushin, M.Yu. Zorkaltseva, *Rev. Sci. Instrum.*, **85** (10), 104703 (2014). DOI: 10.1063/1.4897167
- [8] P.V. Pripitnev, I.V. Romanchenko, S.N. Maltsev, V.Yu. Konev, V.P. Tarakanov, *IEEE Microwave Wireless Comp. Lett.*, **32** (5), 471 (2022). DOI: 10.1109/LMWC.2021.3138964
- [9] P.V. Pripitnev, R.K. Sobyenin, S.N. Maltsev, V.Yu. Konev, I.V. Romanchenko, in *2023 IEEE 24th Int. Conf. of young professionals in electron devices and materials (EDM)* (IEEE, 2023), p. 730–733. DOI: 10.1109/EDM58354.2023.10225026
- [10] И.В. Романченко, В.В. Ростов, *ЖТФ*, **80** (7), 111 (2010). [I.V. Romanchenko, V.V. Rostov, *Tech. Phys.*, **55** (7), 1024 (2010). DOI: 10.1134/S1063784210070170].
- [11] M.R. Ulmaskulov, S.A. Shunailov, *J. Appl. Phys.*, **130** (23), 234905 (2021). DOI: 10.1063/5.0072352
- [12] J.O. Rossi, F.S. Yamasaki, J.J. Barroso, A.F. Greco, E.G.L. Rangel, A.F. Teixeira, L.P.S. Neto, E. Schamiloglu, *Rev. Sci. Instrum.*, **93** (2), 024704 (2022). DOI: 10.1063/5.0067931
- [13] J. Bragg, J. Dickens, A. Neuber, *J. Appl. Phys.*, **113** (6), 064904 (2013). DOI: 10.1063/1.4792214.
- [14] P. Pripitnev, I. Romanchenko, S. Maltsev, R. Sobyenin, V. Konev, *Rev. Sci. Instrum.*, **94** (5), 054708 (2023). DOI: 10.1063/5.0144386
- [15] M.R. Ulmaskulov, S.A. Shunailov, A. Oganesyanyan, L. Ovchinnikova, *IEEE Microwave Wireless Technol. Lett.*, **33** (8), 1147 (2023). DOI: 10.1109/LMWT.2023.3276479
- [16] G.A. Mesyats, S.D. Korovin, A.V. Gunin, V.P. Gubanov, A.S. Stepchenko, D.M. Grishin, V.F. Landl, P.I. Alekseenko, *Laser Particle Beams*, **21** (2), 197 (2003). DOI: 10.1017/S0263034603212015
- [17] V.Yu. Konev, A.I. Klimov, P.V. Pripitnev, R.K. Sobyenin, V.V. Barmin, S.N. Maltsev, in *2023 IEEE 24th Int. Conf. of young professionals in electron devices and materials (EDM)* (IEEE, 2023), p. 640–644. DOI: 10.1109/EDM58354.2023.10225048