

## НОВЫЕ РАДИОЭЛЕКТРОННЫЕ СИСТЕМЫ И ЭЛЕМЕНТЫ

УДК 537.862

# ГИРОМАГНИТНЫЙ ИМПУЛЬСНЫЙ ТРАНСФОРМАТОР ДЛЯ ГЕНЕРАЦИИ НАНОСЕКУНДНЫХ СВЕРХВЫСОКОЧАСТОТНЫХ ИМПУЛЬСОВ

© 2019 г. П. В. Припутнев<sup>1, \*</sup>, И. В. Романченко<sup>1</sup>, В. В. Ростов<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Институт сильноточной электроники СО РАН,  
Российская Федерация, 634055 Томск, просп. Академический, 2/3

\*E-mail: priputnev Pavel@gmail.com

Поступила в редакцию 13.07.2016 г.

После доработки 28.02.2018 г.

Принята к публикации 29.09.2018 г.

Исследована возможность создания генератора наносекундных СВЧ-импульсов за счет возбуждения затухающей гиромагнитной прецессии в феррите, малого по сравнению с длиной волны размера. Рассмотрены вопросы возбуждения колебаний в предложенной схеме и передачи их в нагрузку. В основе предложенной схемы взята модель низкоиндуктивного одновиткового трансформатора, замагниченного в направлении, ортогональном полю обмоток.

DOI: 10.1134/S0033849419030161

### ВВЕДЕНИЕ

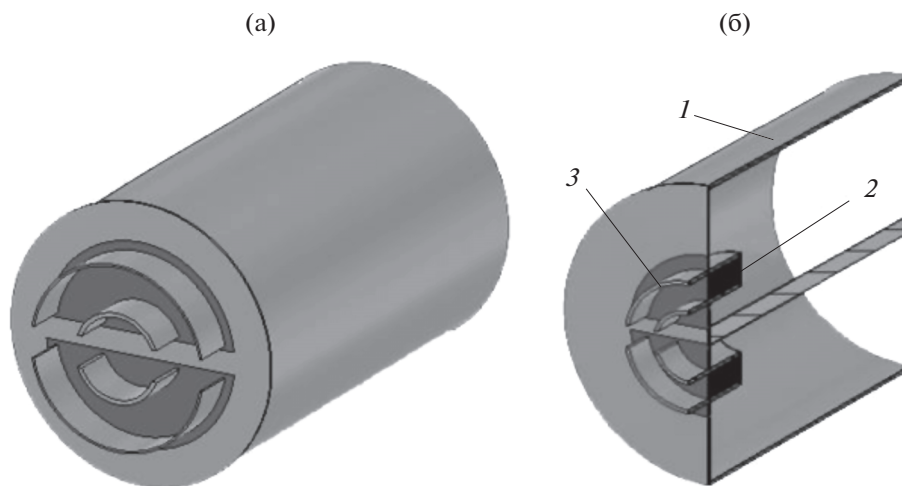
За последние годы получили развитие генераторы СВЧ-импульсов, принцип работы которых основан на возбуждении гиромагнитной прецессии в нелинейных передающих линиях [1–3]. Такие генераторы позволяют получать радиочастотные импульсы наносекундной длительности с пиковой мощностью в сотни мегаватт. Из-за отсутствия вакуумных и электронно-оптических систем они могут занять собственную нишу среди различных источников, и уже сегодня вызывают интерес у потребителей. Возбуждение гиромагнитной прецессии в нелинейных линиях происходит за счет быстрого изменения направления вектора намагниченности предварительно намагниченного до насыщения феррита [4]. При этом нелинейные линии способны генерировать электромагнитные колебания с частотой до 4 ГГц [5]. Перестройка частоты генерации осуществляется за счет изменения амплитуды магнитных полей, прикладываемых к ферриту [3], что дает определенные преимущества данному способу генерации перед генераторами биполярных высоковольтных импульсов фиксированной длительности [6, 7]. Для ряда задач, например, для биологических исследований, представляет практический интерес уменьшение размеров генераторов с намагниченным ферритом. В данной статье обсуждается возможность создания генератора наносекундных СВЧ-импульсов за счет возбуждения гиромагнитной прецессии не в распределенной системе нелинейной линии, а в сосредоточенном ферритовом образце, что позволит уменьшить габариты генератора. Данная возмож-

ность рассматривается на основе аналитических оценок и моделирования с помощью программного обеспечения Ansys HFSS.

### 1. КОНЦЕПЦИЯ ГЕНЕРАТОРА

Идея использовать возбуждение гиромагнитной прецессии в феррите малого по сравнению с длиной волны размера для генерации СВЧ-импульсов предлагалась еще в 60-е гг. [8]. Однако она не получила дальнейшего развития из-за низкой связи между колебаниями намагниченности и ВЧ-колебаниями в выходном тракте генератора. Также высказывалась идея использовать импульсное перемагничивание насыщенного феррита для формирования осциллирующего поля, ускоряющего электронный пучок [9], но экспериментально реализована эта идея не была. В данной статье предлагается новая схема генератора СВЧ-импульсов с намагниченным ферритом, представляющая собой низкоиндуктивный импульсный трансформатор с одним витком в первичной и вторичной обмотке (рис. 1), роль витков в котором играют две коаксиальные короткозамкнутые передающие линии. Проводники второго коаксиала, имеющие поперечные разрезы, выводятся через отверстия в короткозамыкающей стенке первого коаксиала (рис. 2). Сам трансформатор помещается во внешнее продольное магнитное поле, которое обеспечивает предварительное насыщение феррита.

Принцип действия предлагаемого устройства состоит в следующем. Импульс тока с субнаносе-



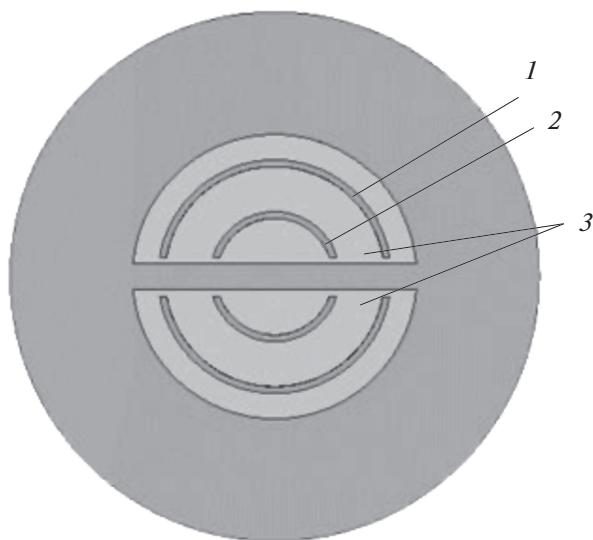
**Рис. 1.** Гиромагнитный трансформатор: а – конструкция, б – вид в разрезе; 1 – первый коаксиал (первичная обмотка), 2 – феррит, 3 – второй коаксиал (вторичная обмотка).

кундным фронтом от генератора высоковольтных импульсов проходя по первому коаксиалу создает азимутальное магнитное поле, которое в результате импульсного перемагничивания насыщенного в продольном направлении феррита возбуждает в нем гиромагнитную прецессию. Затухающие колебания магнитного потока в резонаторе, образованном витком вторичной обмотки, в свою очередь приводят к возбуждению электромагнитных колебаний, которые передаются по второму коаксиалу в нагрузку (рис. 3). Таким образом, анализ процесса генерации СВЧ-сигнала в гиромагнитном

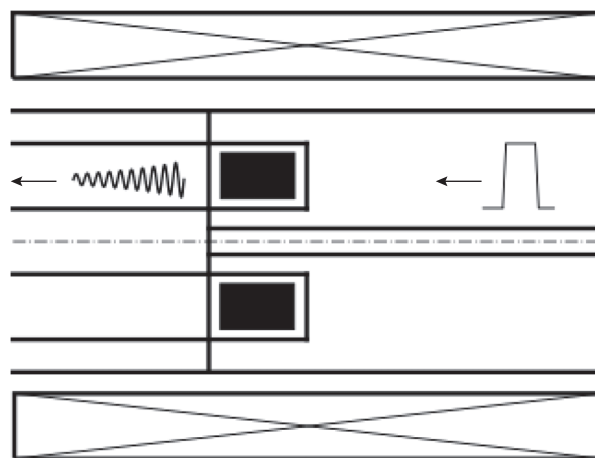
трансформаторе можно разделить на три задачи: формирование субнаносекундного фронта азимутального поля в феррите, возбуждение гиромагнитной прецессии, вывод СВЧ-сигнала во второй коаксиал. Рассмотрим их последовательно.

## 2. ПЕРЕДАЧА СУБНАНОСЕКУНДНОГО ФРОНТА

Для оценки фронта азимутального магнитного поля, формируемого в феррите предварительно сформированным фронтом тока в первом коаксиале, можно рассмотреть задачу искажения фронта импульса в таком трансформаторе. Искажение фронта импульсного трансформатора можно рассмотреть с помощью схемы замещения (рис. 4) [10]. Нормированное напряжение фронта переда-



**Рис. 2.** Короткозамыкающая стенка первого коаксиала. 1 – внешний проводник второго коаксиала, 2 – внутренний проводник второго коаксиала, 3 – диэлектрик.



**Рис. 3.** Схема работы гиромагнитного трансформатора.

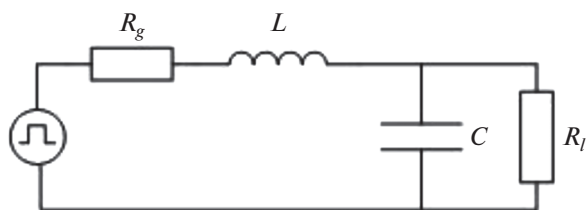


Рис. 4. Схема замещения для трансформаторной цепи для анализа процессов формирования фронта.

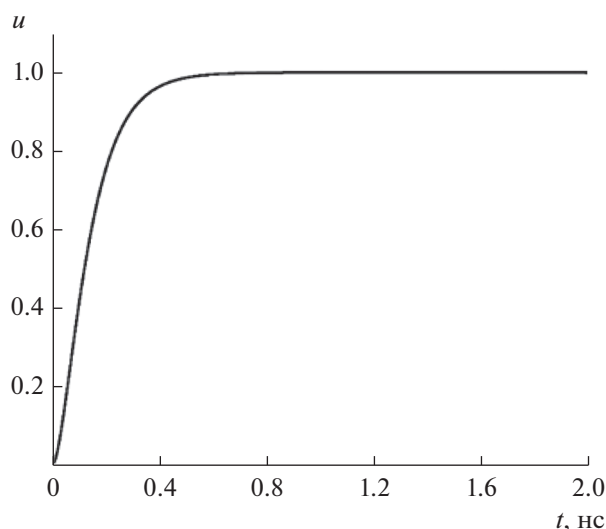


Рис. 5. Форма импульса напряжения на нагрузке импульсного трансформатора при подаче прямоугольного импульса.

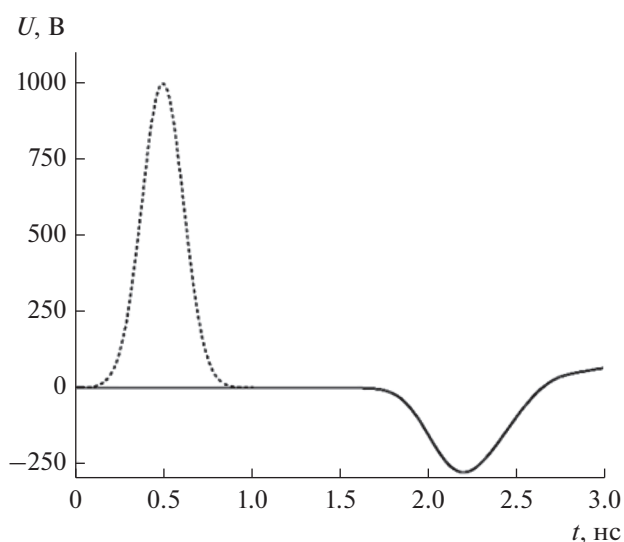


Рис. 6. Результаты моделирования передачи импульса трансформатором. Входной сигнал – пунктирная линия, выходной сигнал – сплошная линия.

ваемого импульса на нагрузке описывается следующей функцией

$$u = 1 - \exp\left(-\delta \frac{t}{\sqrt{\alpha LC}}\right) \left[ \operatorname{ch}\left(\sqrt{1-\delta^2} \frac{t}{\sqrt{\alpha LC}}\right) + \frac{\delta}{\sqrt{1-\delta^2}} \operatorname{sh}\left(\sqrt{1-\delta^2} \frac{t}{\sqrt{\alpha LC}}\right) \right], \quad (1)$$

где

$$\alpha = \frac{R_l}{R_g + R_l}, \quad \delta = \frac{\sqrt{\alpha} \sqrt{L}}{2 \sqrt{C}} \left( \frac{1-\alpha R_l C}{\alpha} + \frac{1}{R_l} \right). \quad (2)$$

Здесь  $L$  – индуктивность рассеивания,  $C$  – динамическая емкость трансформатора,  $R_l$  – сопротивление нагрузки,  $R_g$  – сопротивление генератора.

Индуктивность рассеивания и динамическая емкость для данной геометрии даются следующими выражениями:

$$L = \frac{\mu_0 h}{2\pi} \ln\left(\frac{R_{o1} R_{l2}}{R_{l1} R_{o2}}\right), \quad C = \frac{2\pi \epsilon_0 \epsilon h}{\ln\left(\frac{R_{o1}}{R_{o2}}\right)} + \frac{2\pi \epsilon_0 \epsilon h}{\ln\left(\frac{R_{l1}}{R_{l2}}\right)}. \quad (3)$$

Здесь  $\mu_0$  – магнитная постоянная,  $\epsilon_0$  – электрическая постоянная,  $\epsilon$  – диэлектрическая проницаемость,  $R_{l1}$ ,  $R_{o1}$  – внутренний и внешний радиусы коаксиальной линии первичной обмотки,  $R_{l2}$ ,  $R_{o2}$  – внутренний и внешний радиусы коаксиальной линии вторичной обмотки,  $h$  – толщина ферритовых колец.

Для аналитических оценок искажения фронта и для моделирования были выбраны следующие радиусы:  $R_{o1} = 60$  мм,  $R_{l1} = 5$  мм,  $R_{o2} = 36$  мм,  $R_{l2} = 20$  мм. Для ферритовых колец были выбраны размеры  $40 \times 65$  мм с общей толщиной  $h = 6$  мм. На рис. 5 представлена форма фронта импульса на нагрузке такого трансформатора при подаче на него прямоугольного импульса. На рис. 6 представлены результаты моделирования прохождения импульса через гиромангнитный трансформатор при помощи программы Ansys HFSS.

Как видно из результатов моделирования, искажения субнаносекундного фронта в этой геометрии практически отсутствуют. Как следует из опыта возбуждения СВЧ-колебаний в нелинейных линиях, оно происходит эффективно, когда длительность фронта падающего импульса меньше или сравнима с периодом возбуждаемых колебаний [1]. Рассмотрим задачу возбуждения гиромангнитной прецессии в феррите субнаносекундным фронтом азимутального магнитного поля на частоте около 1 ГГц, пренебрегая краевыми эффектами.

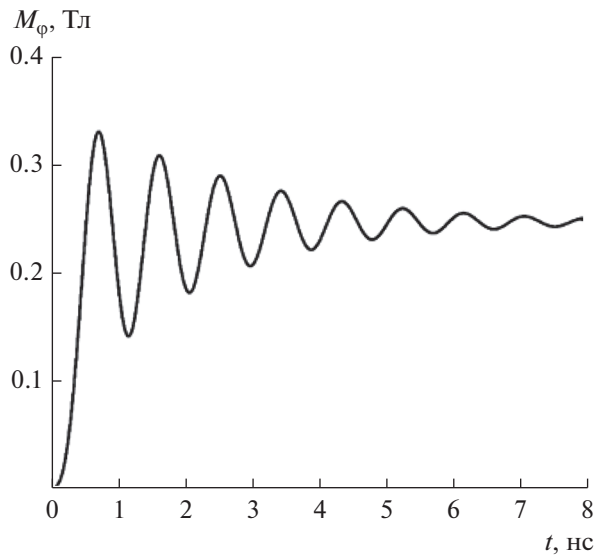


Рис 7. Изменение во времени азимутальной компоненты вектора намагниченности.

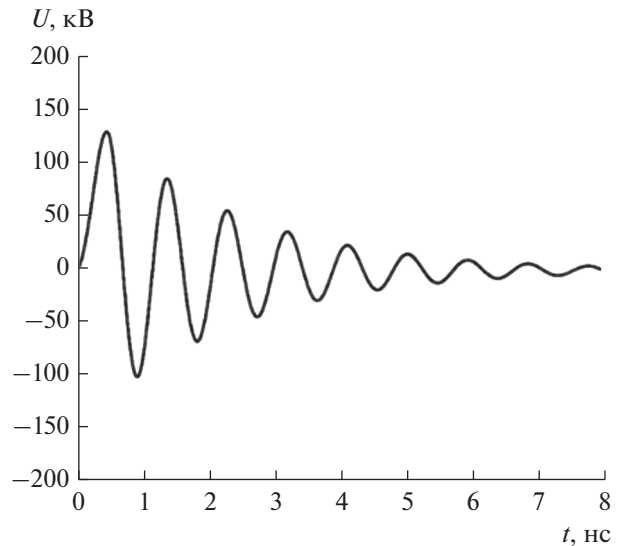


Рис 8. Временная зависимость ЭДС, создаваемой прецессией вектора намагниченности в тонком ферритовом кольце.

### 3. ВОЗБУЖДЕНИЕ ГИРОМАГНИТНОЙ ПРЕЦЕССИИ В НАМАГНИЧЕННОМ ФЕРРИТЕ ИМПУЛЬСНОГО ТРАНСФОРМАТОРА

Для оценки частоты и амплитуды возбуждаемых колебаний необходимо рассматривать процессы импульсного перемагничивания феррита. Динамика вектора намагниченности описывается уравнением Ландау–Лифшица [11]

$$\frac{\partial \vec{M}}{\partial t} = -\gamma \mu_0 [\vec{M}, \vec{H}] - \frac{\alpha \gamma \mu_0}{M_s} [\vec{M}, [\vec{M}, \vec{H}]]. \quad (4)$$

Здесь  $\vec{M}$  – вектор намагниченности,  $\vec{H}$  – вектор напряженности магнитного поля,  $\mu_0$  – магнитная постоянная,  $\gamma$  – гиромагнитное отношение для электрона,  $\alpha$  – феноменологический декремент затухания,  $M_s$  – намагниченность насыщения.

Первый член в правой части описывает прецессию вектора намагниченности, второй член отвечает за затухание. В случае гиромагнитного импульсного трансформатора, полагая толщину ферритового кольца меньше характерной длины волны для частоты гиромагнитной прецессии, можно найти численное решение этого уравнения в цилиндрической системе координат при следующих компонентах вектора напряженности магнитного поля:  $H_r = 0$ ,

$$H_\phi = \begin{cases} \frac{H_{\phi 0}}{\tau} t, & 0 < t < \tau \\ H_{\phi 0}, & t > \tau \end{cases}, \quad H_z = H_{z0},$$

где  $\tau$  – характерное время нарастания тока в линии. Малость толщины ферритового кольца позволяет пренебречь волновыми процессами в феррите.

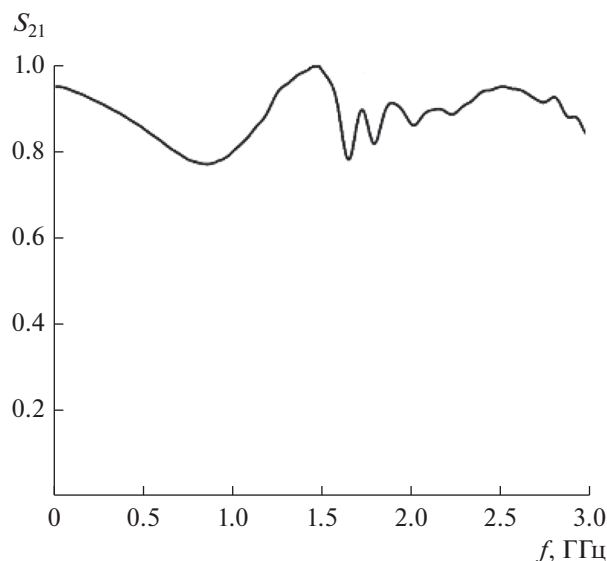
Начальными условиями в этом случае будут следующие значения компонент вектора намагниченности:  $M_r = 0$ ,  $M_\phi = 0$ ,  $M_z = M_s$ . Решение для азимутальной компоненты вектора намагниченности  $M_\phi$  при  $\alpha = 0.07$ ,  $M_s = 0.35$  Тл,  $\tau = 0.5$  нс,  $H_{\phi 0} = 30$  кА/м,  $H_z = 22$  кА/м представлено на рис. 7.

Используя решение (4), можно найти ЭДС, обусловленную прецессией азимутальной компоненты вектора намагниченности, как  $U = \int \frac{dM_\phi}{dt} dS$  в ферритовом кольце с размерами  $40 \times 65$  мм (рис. 8).

Из рисунка видно, что при таких компонентах вектора напряженности магнитного поля прецессия вектора намагниченности будет создавать ЭДС во вторичном контуре импульсного трансформатора с частотой 1 ГГц. Рассмотрим, позволяет ли полоса пропускания устройства вывести эти колебания во второй коаксиал.

### 4. ВЫВОД СВЧ-МОЩНОСТИ ВО ВТОРИЧНЫЙ КОНТУР ИМПУЛЬСНОГО ТРАНСФОРМАТОРА

На рис. 9 представлены результаты моделирования прохождения импульса с гауссовской огибающей по второму коаксиалу через короткозамыкающую стенку. В моделировании входной порт, через который импульс заходит во второй коаксиал, находился на его короткозамыкающей стенке. Второй порт располагался в конце второго коаксиала. Из рисунка видно, что предложенная геометрия короткозамыкающей стенки первого коаксиала позволяет передать ВЧ-колебания гиромагнитной прецессии вектора намагниченно-



**Рис. 9.** Частотная зависимость параметра прохождения  $S_{21}$  гауссовского импульса через короткозамыкающую стенку коаксиала первичной обмотки.

сти феррита в широкой полосе по второму коаксиалу в нагрузку с эффективностью, превышающей 50%.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, на основе результатов численного моделирования в Ansys HFSS показана принципиальная возможность создания новой схемы генератора наносекундных СВЧ импульсов с намагниченным ферритом. На основании аналитических оценок и численного моделирования можно полагать, что предложенная геометрия им-

пульсного трансформатора способна обеспечить формирование крутого фронта азимутального магнитного поля, необходимого для возбуждения гиромангнитной прецессии в феррите. Согласно расчетам коэффициента прохождения СВЧ-импульса через короткозамыкающую стенку  $S_{21}$ , данная геометрия позволяет вывести колебания, возбужденные в феррите с эффективностью более 50% в нагрузку, что подразумевает дальнейшее излучение при помощи соответствующей антенны.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Губанов В.П., Гунин А.В., Ковальчук О.Б. и др. // Письма в ЖТФ. 2009. Т. 35. № 13. С. 81.
2. Rostov V.V., Bykov N.M., Bykov D.N. et al. // IEEE Trans. 2010. V. PS-38. № 10. P. 2681.
3. Андреев Ю.А., Кошелев В.И., Романченко И.В. и др. // РЭ. 2013. Т. 58. № 4. С. 337.
4. Романченко И.В., Ростов В.В. // ЖТФ. 2010. Т. 80. № 7. С. 111.
5. Bragg J.-W.B., Sullivan III W.W., Mauch D. et al. // Rev. Scientific Instruments. 2013. V. 84. № 5. P. 054703-1.
6. Ефремов А.М., Кошелев В.И., Ковальчук Б.М. и др. // РЭ. 2007. Т. 52. № 7. С. 813.
7. Андреев Ю.А., Ефремов А.М., Кошелев В.И. и др. // РЭ. 2011. Т. 56. № 12. С. 1457.
8. Shaw H.J., Elliott B.J., Harker K.J., Karp A. // J. Appl. Phys. 1966. V. 37. № 3. P. 1060.
9. Вахрушин Ю.П., Анацкий А.И. Линейные индукционные ускорители / М.: Атомиздат, 1978.
10. Вдовин С.С. Проектирование импульсных трансформаторов. Л.: Энергоатомиздат, 1991.
11. Stöhr J., Siegmann H.C. Magnetis. From Fundamentals to Nanoscale Dynamics / Berlin: Springer, 2006.