

09

Эффективная трансформация энергии высоковольтных импульсов в высокочастотные колебания на основе передающей линии с насыщенным ферритом

© В.П. Губанов, А.В. Гунин, О.Б. Ковальчук,
В.О. Кутенков, И.В. Романченко, В.В. Ростов

Институт сильноточной электроники СО РАН, Томск
E-mail: riv@fe.hcei.tsc.ru

Поступило в Редакцию 4 декабря 2008 г.

Исследован новый способ преобразования высоковольтного видеоимпульса в высокочастотные колебания в нелинейной передающей линии с временной дисперсией. Временная дисперсия обеспечивается импульсным перемагничиванием феррита, который в исходном состоянии приведен в насыщение внешним полем. Для 9 ns импульса достигнута средняя эффективность преобразования, близкая к 10%. Показана возможность возбуждения колебаний на частоте от 600 MHz до 1.1 GHz с шириной спектра около 15% для импульсов с амплитудой от 110 до 290 kV. Найденные оптимальные условия по полю подмагничивания лежат в диапазоне 20–40 kA/m.

PACS: 75.50.Dd, 85.80.Jm

Преобразование энергии электромагнитного видеоимпульса в высокочастотные колебания при распространении его вдоль нелинейной передающей линии в последнее время привлекает все больший интерес [1–3]. Наилучший результат был достигнут в передающих линиях с магнитной нелинейностью [2], где в качестве нелинейной среды традиционно используется ферромагнетик. Как известно, распространение импульса по линии с ненасыщенным ферритом сопровождается формированием ударного фронта [4]. Длительность сформировавшегося стационарного фронта может достигать сотен пикосекунд [5,6]. Для возбуждения осцилляций ударным фронтом нелинейная линия должна обладать дисперсионными свойствами, связанными с обратимыми про-

цессами, в отличие от ситуации в линии с ненасыщенным ферритом, где дисперсия связана только с диссипацией [7]. Возможна реализация двух видов дисперсии: пространственной и временной. Подход, основанный на применении пространственной дисперсии, был представлен в [8] и получил дальнейшее развитие в [2,3]. В настоящей статье излагаются результаты экспериментальных исследований по возбуждению высокочастотных колебаний в однородной коаксиальной нелинейной линии, обладающей временной дисперсией.

Распространение электромагнитных волн в линии передачи с магнитной нелинейностью описывается телеграфными уравнениями:

$$\frac{\partial J}{\partial z} = -C_0 \frac{\partial U}{\partial t}, \quad (1)$$

$$\frac{\partial U}{\partial z} = -\frac{\partial \Phi}{\partial t}, \quad (2)$$

где C_0 — емкость единицы длины линии. Зависимость магнитного потока Φ от тока J и напряжения U в коаксиальной линии можно разбить на две составляющие — линейную и нелинейную:

$$\frac{\partial \Phi}{\partial t} = L_0 \frac{\partial J}{\partial t} + \mu_0 k \frac{\partial M_\theta}{\partial t}, \quad (3)$$

где L_0 — индуктивность единицы длины линии без учета магнитных свойств, μ_0 — магнитная проницаемость вакуума, k — геометрический коэффициент, имеющий размерность длины, M_θ — азимутальная компонента намагниченности. Экспериментальные условия соответствуют „макроспиновому приближению“ [9], в котором все отдельные электронные спины ведут себя как целое. Это достигается за счет того, что внешнее продольное магнитное поле изначально приводит феррит в насыщенное состояние с намагниченностью M_s . Азимутальное магнитное поле высоковольтного импульса не изменяет амплитуды намагниченности, а изменяет только ее направление, $|\mathbf{M}| = M_s = \text{const}$. В таких условиях движение вектора намагниченности \mathbf{M} под действием магнитного поля \mathbf{H} по поверхности сферы описывается уравнением Ландау–Лившица [9]:

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

где γ — гиромагнитное отношение для электрона, α — феноменологический коэффициент затухания. Уравнение (4) определяет временную

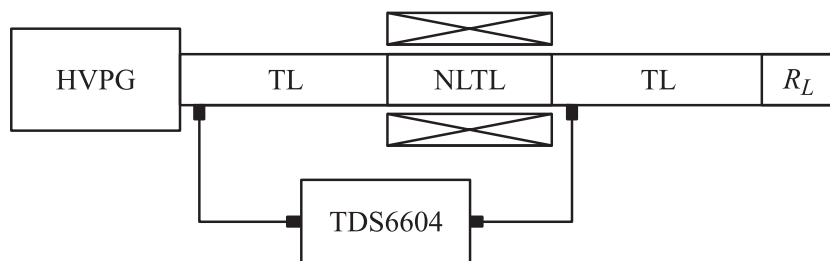


Рис. 1. Блок-схема экспериментальной установки: HVPG — генератор высоковольтных импульсов; TL — передающая линия; NLTL — нелинейная передающая линия; R_L — резистивная нагрузка; TDS6604 — цифровой осциллограф Tektronix.

дисперсию нелинейной передающей линии. Первое слагаемое в правой части обусловлено обратимыми процессами [9], именно оно ответственно за возбуждение электромагнитных колебаний в линии. Второе слагаемое связано с диссипацией. Предполагая существование стационарного решения системы уравнений (1)–(3) для бесконечно длинной линии в виде затухающей несинусоидальной волны со скоростью v_g [4,7], можно показать, что амплитуда тока в этой волне пропорциональна азимутальной компоненте намагниченности, $J(t - z/v_g) \propto M_\theta(t - z/v_g)$. Таким образом, можно предполагать не только качественную связь возбуждения колебаний тока в линии с явлением затухающей магнитной прецессии при импульсном перемагничивании [9], но и количественную связь с амплитудой колебаний вектора намагниченности.

Экспериментальная установка схематически изображена на рис. 1. Высоковольтный импульс от генератора, основанного на трансформаторе Тесла в формирующей линии, подавался в передающую линию, заполненную трансформаторным маслом, где регистрировался осциллографом с аналоговой полосой 6 GHz при помощи емкостного делителя напряжения. Длительность импульса по полувисоте составляла 9 ns, а амплитуда могла меняться от 110 до 290 kV. После взаимодействия с нелинейной линией, помещенной в соленоид, импульс формировался на волновом сопротивлении следующей передающей линии, где также регистрировался осциллографом. Длина нелинейной линии варьировалась от 0 до 77 см. В конце системы высоковольтный импульс

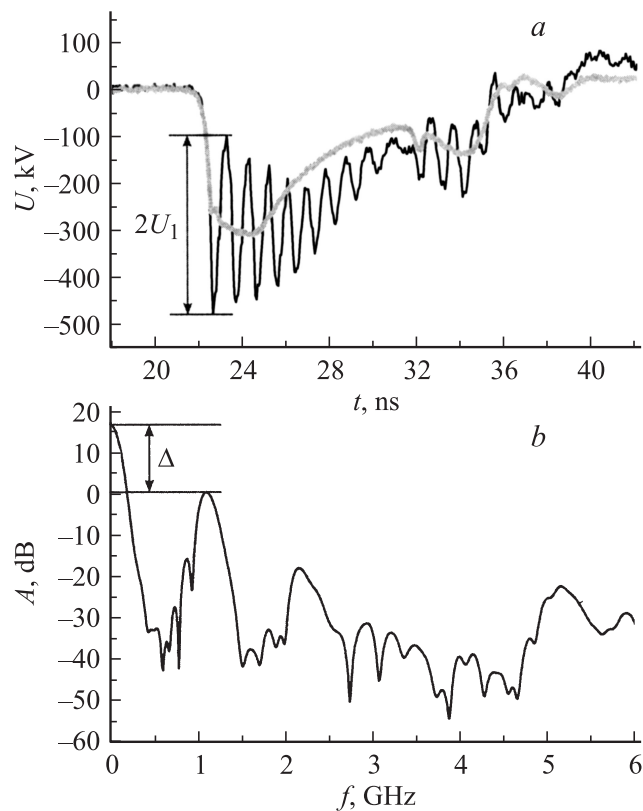


Рис. 2. Осциллограмма напряжения высоковольтного импульса после взаимодействия с нелинейной линией (*a*) при оптимальном подмагничивании (черным) и без подмагничивания (серым) и его спектральное разложение (*b*). Амплитуда падающего импульса составляет $U_{in} = 290$ kV, после подмагничивания — $H_z = 32$ kA/m.

поглощался в согласованной нагрузке. В качестве магнитного материала был использован никель-цинковый феррит.

Типичная осциллограмма высоковольтного импульса на выходе нелинейной линии и его спектральное разложение представлены на рис. 2.

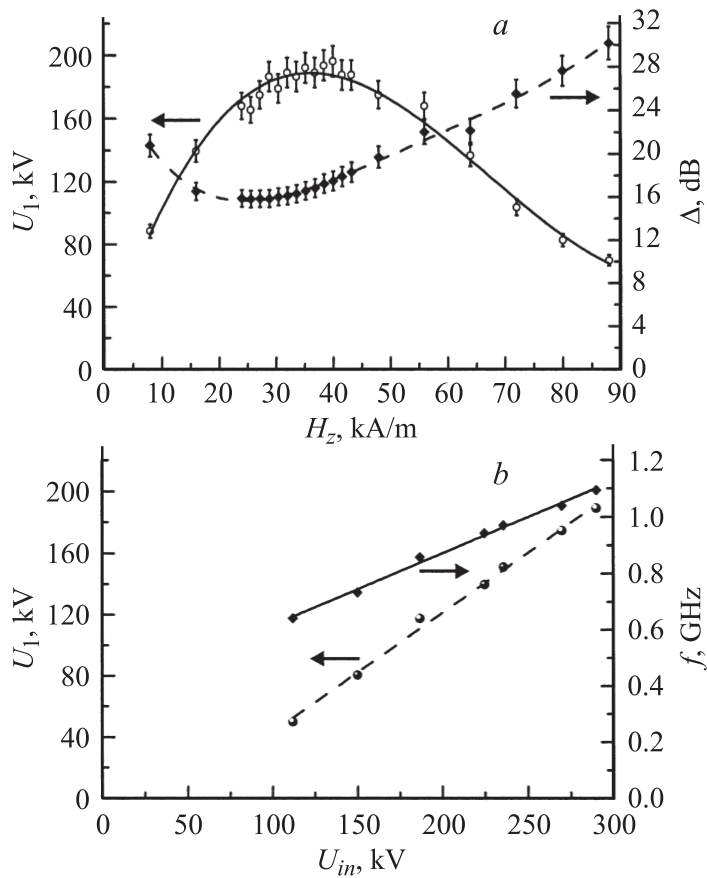


Рис. 3. Зависимость трансформации энергии от внешнего поля (а). Зависимость центральной частоты колебаний и амплитуды первой осцилляции от амплитуды падающего импульса при максимальной длине линии (б).

Ситуация на рис. 2 соответствует максимальной амплитуде высоковольтного импульса и максимальной длине нелинейной линии. При прохождении нелинейной линии происходит эффективное преобразование энергии падающего импульса в высокочастотные колебания. Для приведенной осциллограммы средний энергетический КПД для первых

8 осцилляций составляет около 10%. В отсутствие подмагничивания формируется только стационарный фронт. При подмагничивании сначала формируется ударный фронт, за которым возбуждается несколько затухающих осцилляций малой амплитуды. Затем, распространяясь по линии позади фронта, осцилляции усиливаются, и амплитуда первого колебания U_1 на максимальной длине достигает 190 kV (рис. 2, *a*). Центральная частота колебаний на рис. 2 составляет 1.1 GHz, ширина спектра по уровню — 3 dB — около 15%.

Существует область значений поля подмагничивания, при котором преобразование энергии происходит наиболее эффективно. Она определяется, по-видимому, только типом феррита, и для NiZn феррита, примененного в эксперименте, приходится на 20–40 kA/m. Зависимость U_1 и Δ (рис. 2) от внешнего поля при максимальном напряжении и длине линии приведены на рис. 3, *a*.

При изменении амплитуды падающего импульса в пределах, доступных в эксперименте, амплитуда первой осцилляции и центральная частота колебаний линейно нарастают (рис. 3, *b*). Эксперименты показывают высокую стабильность возбуждения колебаний при фиксированных внешних условиях, сам же процесс формирования колебаний остается открытым для дальнейших экспериментальных исследований и теоретического анализа. Таким образом, результаты эксперимента указывают на перспективность получения высокочастотных узкополосных импульсов на частотах от 600 MHz до 1.1 GHz на основе магнитной нелинейной линии с временной дисперсией.

Список литературы

- [1] *Gaudet J., Schamiloglu E., Rossi J.O. et al. // IEEE International Power Modulator Conference. Las Vegas. IEEE. 2008. P. 82.*
- [2] *Seddon N., Spikings C.R., Dolan J.E. // IEEE Pulsed Power Plasma Science Conference, Albuquerque. IEEE. 2007. P. 678–681.*
- [3] *Белянцев А.М., Козырев А.Б. // ЖТФ. 2001. Т. 71. В. 7. С. 79–82.*
- [4] *Гапонов А.В., Островский Л.А., Фрейдман Г.И. // Изв. вузов. Радиофизика. 1967. Т. 10. В. 9–10. С. 1376–1413.*
- [5] *Dolan J.E., Bolton H.R. // IEEE Proc-Sci. Meas. Technol. 2000. V. 147. N 5. P. 237–242.*
- [6] *Афанасьев К.В., Ковальчук О.Б., Кутенков В.О. и др. // ПТЭ. 2008. В. 3. С. 86–90.*

- [7] *Белянцев А.М., Гапонов А.В., Фрейдман Г.И.* // ЖТФ. 1965. Т. 35. В. 4. С. 677–689.
- [8] *Белянцев А.М., Дубнев А.И., Климин С.Л.* и др. // ЖТФ. 1995. Т. 65. В. 8. С. 132–142.
- [9] *Stöhr J., Siegmann H.C.* // Magnetism. Berlin, Heidelberg: Springer, 2006.