

ГЕНЕРАТОР ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ ИМПУЛЬСОВ С ФРОНТОМ СУБНАНОСЕКУНДНОЙ ДЛИТЕЛЬНОСТИ, ФОРМИРУЕМЫМ ГИРОМАГНИТНОЙ ПЕРЕДАЮЩЕЙ ЛИНИЕЙ

© 2021 г. Ю. В. Рыбин^а, В. В. Еремкин^{б,*}, А. С. Марабян^б

^а Научно-производственное объединение “Флагман”

Россия, 192012, Санкт-Петербург, ул. Бабушкина, 123

^б НИИ электрофизической аппаратуры им. Д.В. Ефремова

Россия, 196641, Санкт-Петербург, Металлострой, дорога на Металлострой, 3

*e-mail: jerom52@rambler.ru

Поступила в редакцию 13.05.2020 г.

После доработки 28.05.2020 г.

Принята к публикации 01.06.2020 г.

Продемонстрирована возможность обострения фронта импульса напряжения, формируемого высоковольтным импульсным генератором, в гиромагнитной линии за счет возбуждения гиромагнитной прецессии вектора намагниченности насыщенного феррита. На нагрузке 50 Ом получены импульсы напряжения с длительностью фронта 135–140 пс, амплитудой 170 кВ и частотой следования импульсов 300 Гц. Описана схема генератора и приведены результаты экспериментов.

DOI: 10.31857/S0032816220060166

1. ВВЕДЕНИЕ

Для ряда применений сильноточной наносекундной электроники требуются высоковольтные импульсные генераторы, формирующие импульсы напряжения амплитудой сотни киловольт и с длительностью фронта 100–150 пс. В качестве первичного формирователя импульса напряжения в таких случаях используют генераторы Маркса, схемы с высоковольтным импульсным трансформатором, заряжающим высоковольтную накопительную емкость, коммутируемую разрядником-обострителем, либо индуктивные накопители с полупроводниковыми размыкателями. Длительность фронта импульса напряжения на выходе таких устройств, как правило, достигает единиц наносекунд.

Для дальнейшего обострения фронта импульса напряжения используются линии электромагнитной ударной волны [1, 2]. В коаксиальной линии в качестве нелинейной среды применяются никель-цинковые ферриты, что позволяет обострить фронт импульса напряжения до 300–400 пс. Дальнейшее развитие этого направления связано с использованием передающих линий с насыщенным ферритом [3–5]. В англоязычной литературе нелинейные линии данного типа получили название “гиромагнитных”, поскольку возбуждение высокочастотных колебаний тока происходит за счет возбуждения гиромагнитной прецессии вектора намагниченности насыщенного феррита.

В [3] описана нелинейная линия с насыщенным ферритом, в которой фронт импульса напряжения амплитудой 100 кВ обострялся от 1.6 нс до 85 пс при нагрузке 50 Ом. В настоящее время это направление представляется наиболее перспективным при разработке высоковольтных импульсных генераторов субнаносекундного диапазона.

2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

В качестве первичного формирователя использовался высоковольтный импульсный наносекундный генератор NS-140D (рис. 1), предназначенный для формирования импульсов напряжения амплитудой $U = 140–150$ кВ на нагрузке 50 Ом с длительностью фронта ≤ 1 нс. Генератор был разработан для системы предыонизации на основе эффекта убегания электронов в плазме наносекундного скользящего разряда для сверххатмосферного CO₂-лазера [6]. В нем использована зарядная схема с высоковольтным импульсным трансформатором на LC-связанных контурах как наиболее простая в изготовлении и обеспечивающая минимальные массогабаритные характеристики. На основе генератора NS-140D был разработан высоковольтный импульсный генератор субнаносекундного диапазона SN-170D.

Генератор SN-170D включает в себя (рис. 2) размещенные в герметичном корпусе (140 × 140 × 410 мм), заполненном трансформаторным мас-



Рис. 1. Высоковольтный импульсный генератор NS-140D.

лом, высоковольтный накопительный конденсатор первичного контура C_1 емкостью 47 нФ, заряжаемый до напряжения 10 кВ импульсным источником электропитания ИП за время ~ 1 мс; коммутатор P_1 , в качестве которого используется газоразрядный коммутатор РУ-62, управляемый генератором поджигающих импульсов ГПИ; высоковольтный

импульсный трансформатор ИТ₁ на LC-связанных контурах; высоковольтную накопительную емкость C_2 ; высоковольтный разрядник-обостритель P_2 ; индуктивность L , задающую начальный потенциал электроду разрядника P_2 .

Конденсатор C_1 образован тремя конденсаторными секциями, соединенными последовательно, что определяет величину индуктивности токоподвода к первичной обмотке импульсного трансформатора, равную $L_c \approx 20$ нГн. В качестве разрядника P_2 используется разрядник-обостритель Р-43 с напряжением срабатывания $U = 170$ кВ. Величина высоковольтной накопительной емкости с учетом паразитной емкости высоковольтного трансформатора составляет $C_2 = 80$ пФ при запасаемой энергии $W = 1.2$ Дж.

Генератор подключен к гиromaгнитной коаксиальной передающей линии ГПЛ длиной 13 см, выполненной из немагнитного материала, с внешним диаметром $D = 24$ мм и внутренним $d = 6$ мм, заполненной никель-цинковыми ферритовыми кольцами марки М0,7ВТ-1 с размерами $\varnothing 10 \times \varnothing 6 \times 2$ мм.

Поверх гиromaгнитной передающей линии расположена обмотка подмагничивания из 500 витков, которая питается от генератора подмагничивания ГП. ГПЛ подключена к передающей линии ПЛ с волновым сопротивлением $\rho = 50$ Ом, нагруженной на согласованное сопротивление $R = 50$ Ом.

Напряжение в передающей линии измерялось емкостным делителем напряжения, ток — малоиндуктивным шунтом, набранным из SMD-резисторов типоразмера 1206 с суммарным сопротивлением $R_{ш} = 55$ мОм. Емкостный делитель напряжения калибровался шунтом. Регистрация сигналов осуществлялась осциллографом Teledyne LeCroy WR 640 Zi. Внешний вид генератора SN-170D приведен на рис. 3.

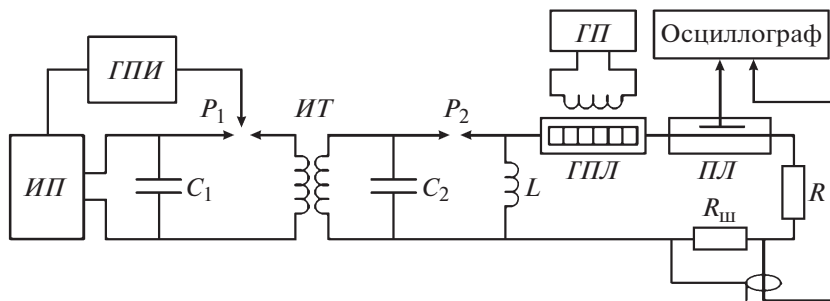


Рис. 2. Структурная схема высоковольтного импульсного генератора SN-170D. ИП — импульсный высоковольтный источник электропитания; ГПИ — генератор поджигающих импульсов; ИТ — высоковольтный импульсный трансформатор; ГПЛ — гиromaгнитная передающая линия; ГП — генератор подмагничивания; ПЛ — передающая линия; P_1 — газоразрядный коммутатор РУ-62; P_2 — газоразрядный коммутатор-обостритель Р-43; L — дроссель; C_1 — накопительный конденсатор первичного контура; C_2 — высоковольтная накопительная емкость; R — эквивалентная нагрузка; $R_{ш}$ — измерительный шунт.



Рис. 3. Высоковольтный импульсный генератор SN-170D.

3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

При срабатывании газоразрядного коммутатора P_1 на высоковольтной накопительной емкости C_2 начинает нарастать напряжение. Особенностью трансформаторов на LC -связанных контурах (трансформатор Тесла) является возможность получения малых времен нарастания напряжения. Действительно, в случае резонансных частот высокочастотная и низкочастотная составляющие колебаний напряжения на емкости C_2 определяются следующими выражениями [7]:

$$\omega_1 = \frac{\omega_0}{\sqrt{1-K}}; \quad \omega_2 = \frac{\omega_0}{\sqrt{1+K}}, \quad (1)$$

где $\omega_0 = 1/\sqrt{L_1 C_1} = 1/\sqrt{L_2 C_2}$ – частота свободных колебаний первичного и вторичного контуров трансформатора; ω_1, ω_2 – частоты соответственно высокочастотной и низкочастотной составляющих колебаний; K – коэффициент связи первичной и вторичной обмоток; L_1, L_2 – индуктивность первичной и вторичной обмоток соответственно.

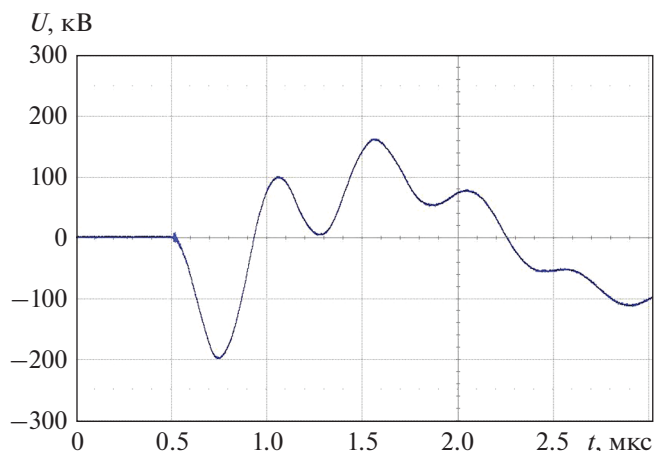


Рис. 4. Осциллограмма зарядного напряжения на высоковольтной емкости в режиме холостого хода.

Это обстоятельство учитывалось при разработке высоковольтного импульсного трансформатора. Расчетное значение коэффициента связи между обмотками составляло $K \approx 0.8$, что обеспечивало время нарастания напряжения на высоковольтной емкости C_2 , равное $t \approx 200$ – 250 нс.

На рис. 4 приведена осциллограмма зарядного напряжения на высоковольтной накопительной емкости C_2 в режиме холостого хода. По осциллограмме можно определить коэффициент связи между первичной и вторичной обмотками как:

$$K = (T_2^2 - T_1^2)/(T_2^2 + T_1^2) = 0.81, \quad (2)$$

где T_1 и T_2 – периоды колебаний высокочастотной и низкочастотной составляющих.

На рис. 5 приведена осциллограмма импульса напряжения на накопительной емкости C_2 при срабатывании разрядника-обострителя Р-43. Напряжение срабатывания разрядника составляло 170 кВ при длительности фронта импульса зарядного напряжения 200 нс. Это позволило работать при средней напряженности электрического поля в трансформаторном масле ~ 35 кВ/мм, что, в свою очередь, обеспечило значения импеданса высоковольтного разрядного контура на уровне ~ 4 Ом.

Осциллограмма импульса напряжения на выходе высоковольтного импульсного генератора и соответственно на входе ГПЛ приведена на рис. 6. Амплитуда импульса напряжения $U_1 = 140$ кВ, длительность фронта $t_1 = 0.8$ нс.

На рис. 7 приведена осциллограмма импульса напряжения после прохождения импульса через ГПЛ при напряженности поля подмагничивания $H = 25.5$ кА/м. В этом случае амплитуда импульса напряжения $U_2 = 170$ кВ и длительность фронта импульса по уровню $(0.1-0.9)U_2$ составила ~ 170 пс. Следует отметить, что при отсутствии подмагни-

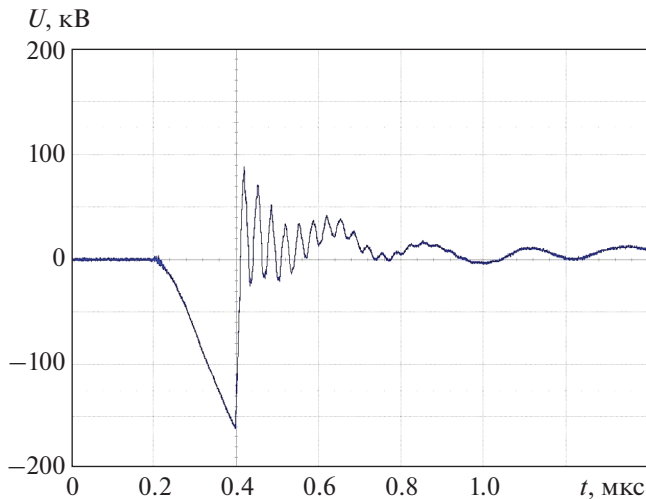


Рис. 5. Осциллограмма зарядного напряжения на высоковольтной емкости при срабатывании газоразрядного коммутатора-обострителя.

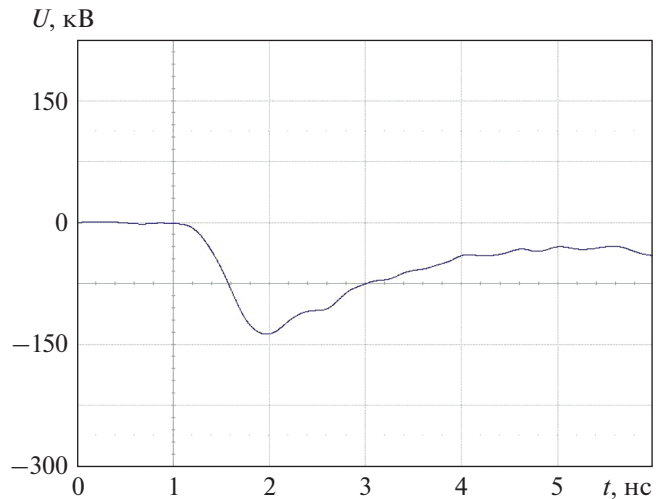


Рис. 6. Осциллограмма импульса напряжения на выходе высоковольтного импульсного генератора NS-140D на эквивалентной нагрузке 50 Ом.

чивания фронт импульса напряжения был равен $t_2 = 350$ пс.

В силу конечных размеров электрода емкостного делителя напряжения ($D = 3$ мм) измеренное значение фронта импульса напряжения может на $\Delta t_1 \sim 15$ пс превышать реальное. Помимо этого, неидеальность конструкции емкостного делителя напряжения и затухания высокочастотных гармоник в измерительном кабеле приводят к увеличению измеренного значения фронта импульса напряжения на $\Delta t_2 \sim 15\text{--}20$ пс. Таким образом, можно с большой долей уверенности утверждать, что реальная длительность фронта импульса напряжения составит $t_3 = 135\text{--}140$ пс при амплитуде импульса напряжения $U_2 = 170$ кВ и частоте следования импульсов $f = 300$ Гц. Возможность работы с такой частотой следования импульсов, по всей видимости, обеспечивается достаточной для деионизации разрядного промежутка газоразрядных коммутаторов временной паузой между импульсами ($\Delta t_3 \sim 2$ мс).

4. ВЫВОДЫ

1. Экспериментально показана возможность обострения фронта высоковольтного импульса напряжения в гиромагнитной линии за счет возбуждения гиромагнитной прецессии вектора намагниченности насыщенного феррита при напряженности поля подмагничивания $H = 25.5$ кА/м.

2. При прохождении импульса напряжения по гиромагнитной линии с насыщенным ферритом происходит увеличение его амплитуды от 140 до 170 кВ и сокращение длительности фронта от 350 до 135–140 пс.

3. Длительность ~ 200 нс фронта импульса зарядного напряжения на высоковольтной емкости позволила работать при средней напряженности электрического поля в трансформаторном масле ~ 35 кВ/мм, что, в свою очередь, дало возможность получить импеданс высоковольтного разрядного контура на уровне ~ 4 Ом.

4. Обеспечение паузы ≈ 2 мс при подаче зарядного напряжения на высоковольтный конденсатор первичного контура C_1 позволило получить рабочую частоту следования импульсов 300 Гц.

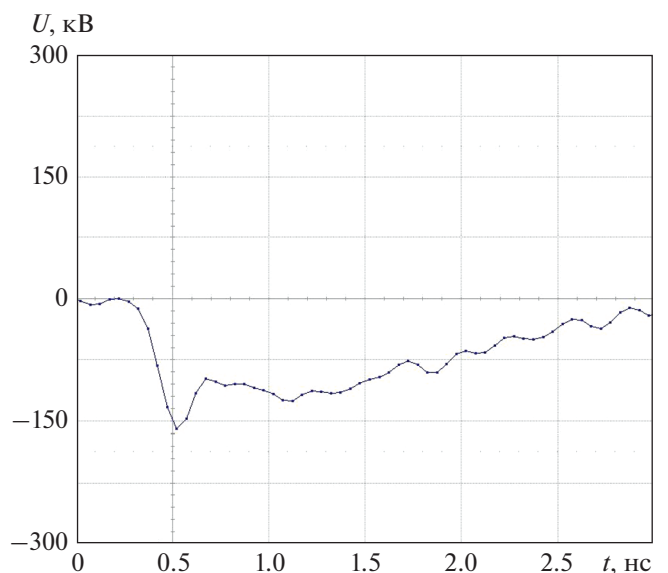


Рис. 7. Осциллограмма импульса напряжения в передающей линии с волновым сопротивлением 50 Ом после прохождения гиромагнитной линии.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Катаев И.Г. Ударные электромагнитные волны. М.: Сов. радио, 1963.
2. Мешков А.Н. // ПТЭ. 1990. № 1. С. 5.
3. Brooker C., Altieri N., Eastwood G., Hoad R., Dolan J.E. // Electron. Lett. 1999. V. 35. № 25. P. 2210.
4. Афанасьев К.В., Ковальчук О.Б., Кутенков В.О., Романченко И.В., Ростов В.В. // ПТЭ. 2008. № 3. С. 86.
5. Романченко И.В. Автореферат ... докт. физ.-мат. наук. Томск: ИСЭ СО РАН, 2019.
6. Дашук П.Н., Кулаков К.С., Кулаков С.Л., Рыбин Ю.В. // ЖТФ. 2008. Вып. 5. С. 47.
7. Вассерман С.Б. Препринт ИЯФ СО АН СССР № 77-110. Новосибирск, 1979.