

ЧАСТОТНЫЙ ГЕНЕРАТОР ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ ИМПУЛЬСОВ НАНОСЕКУНДНОЙ ДЛИТЕЛЬНОСТИ

© 2019 г. К. В. Горбачев^{а,*}, Ю. И. Исаенков^а, А. В. Ключник^а, В. И. Мижирицкий^а,
В. М. Михайлов^а, Е. В. Нестеров^а, В. А. Строганов^а

^а Объединенный институт высоких температур РАН
Россия, 125412, Москва, ул. Ижорская, 13, стр. 2

*e-mail: nst@ihed.ras.ru

Поступила в редакцию 17.08.2018 г.

После доработки 17.08.2018 г.

Принята к публикации 13.09.2018 г.

Описан частотный генератор импульсов напряжения в виде затухающей синусоиды с периодом ~ 6 нс, амплитудой первой полуволны напряжения до ~ 400 кВ и частотой импульсов до 60 Гц. Генератор питается от аккумуляторной батареи (7 А · ч, 36 В) и имеет несколько ступеней повышения напряжения.

DOI: 10.1134/S0032816219020216

ВВЕДЕНИЕ

Генерация частотных импульсов напряжения с длительностью наносекундного диапазона является актуальной задачей для таких областей науки и техники, как плазменная и лазерная физика [1], ускорительная техника [2], генерация импульсного рентгена [3], электроразрядные технологии [4], генерация пучка убегающих электронов в газе [5], исследования по электромагнитной совместимости [6] и ряд других. В последние годы появились научно-технические задачи, предъявляющие особые требования к устройствам генерации импульсов, в частности к форме генерируемых импульсов, к возможности работы в частотном режиме, автономности и мобильности.

Целью данной работы является создание частотного генератора высоковольтных импульсов напряжения наносекундной длительности для исследований импульсной электропрочности материалов и изделий.

СХЕМА ГЕНЕРАТОРА

Принципиальная электрическая схема генератора представлена на рис. 1. Для обеспечения автономности и мобильности генератора в качестве источника питания используется свинцовая аккумуляторная батарея (36 В, 7 А · ч) $АБ_1$. В первой ступени повышения напряжения (с 36 В на батарее до 10 кВ на конденсаторе C_1) используется схема двухтактного преобразования. Основой преобразователя является повышающий трансформатор Tr_2 с рабочей частотой до 50 кГц, выполненный

на ферритовом кольцевом сердечнике. Первичная обмотка имеет две секции с нулевым выводом, которые поочередно коммутируются мощными транзисторными ключами FB180SA10P.

Вторичная обмотка для равномерного распределения высокого напряжения вдоль сердечника выполнена из десяти последовательно соединенных секций. Каждая секция соединена со своим выпрямительным мостом и конденсатором-фильтром. Выпрямленное напряжение с вторичной обмотки трансформатора Tr_2 подается на накопительную емкость C_1 . Накопитель первичного контура C_1 выполнен из набора конденсаторов типа КВИ-3 суммарной емкостью 178 нФ.

Транзисторные ключи FB180SA10P контролируются управляющим блоком электроники (на схеме не показан), который имеет обратную связь с высоковольтным выходом выпрямителей через делитель напряжения U_1 . С блока электроники управляющие импульсы подаются на клеммы K_1-K_3 силовых транзисторов, что позволяет регулировать частоту следования импульсов (10–60 Гц) и уровень выходного напряжения (6–10 кВ) за счет изменения частоты и длительности разрешающих сигналов, подаваемых с управляющего блока на транзисторные ключи.

Высоковольтная клемма конденсатора C_1 закорачивается на “землю” управляемым разрядником P_1 (РУ-62). Для запуска разрядника P_1 используется блок поджига, включающий в себя аккумуляторную батарею (18 В, 1,5 А · ч) $АБ_2$, управляющий транзистор IRF1407, конденсатор

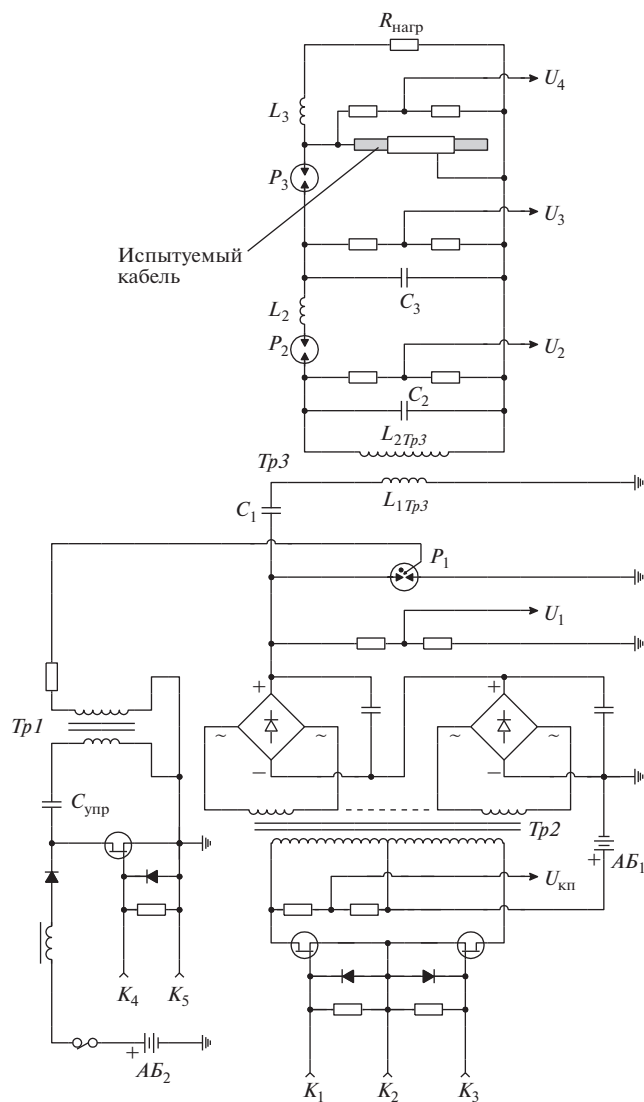


Рис. 1. Схема генератора.

$C_{упр}$ и повышающий трансформатор $Tr1$. Через клеммы K_4 , K_5 осуществляется запуск блока поджига от управляющего блока электроники. Импульс напряжения со вторичной обмотки трансформатора $Tr1$ подается на управляющий электрод разрядника P_1 .

Максимальное время зарядки накопителя C_1 от электронного преобразователя составляет 8.5 мс. После зарядки емкости первичного контура устанавливается пауза в работе преобразователя, длительность которой определяет частоту повторения импульсов генератора. На рис. 2 показаны осциллограммы работы электронного преобразователя. Хотя электронный преобразователь может обеспечить частоту повторения импульсов всего устройства до 100 Гц, она ограничена работой разрядника P_1 (РУ-62) на уровне 60 Гц.

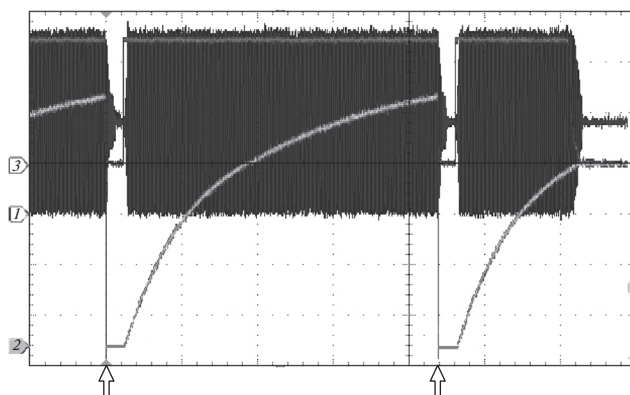


Рис. 2. Осциллограммы напряжений на элементах первой ступени увеличения напряжения (развертка 2 мс/деление): 1 – напряжение $U_{кл}$ на левом (см. рис. 1) силовом транзисторе, амплитуда напряжения 12 В/деление, частота 50 кГц; 2 – напряжение на емкости C_1 , 2 кВ/деление; 3 – сигнал разрешения работы силовых ключей, 2 В/деление (верхняя светлая прямая на фоне цуга).

Вторая ступень повышения напряжения – трансформатор Тесла $Tr3$. Первичная обмотка трансформатора содержит 3 витка шины шириной 135 мм с диаметром намотки 175 мм. Вторичная обмотка, имеющая 112 витков, намотана с шагом 1.1 мм на конусном полиэтиленовом каркасе. Индуктивность первичной обмотки $L_{1Tr3} = 1.15$ мкГн, вторичной – $L_{2Tr3} = 846$ мкГн.

При срабатывании разрядника P_1 (РУ-62) конденсатор C_1 разряжается через первичную обмотку L_{1Tr3} трансформатора Тесла $Tr3$. При этом напряжение вторичной обмотки подается на емкость C_2 , которая заряжается до напряжения ~ 220 кВ. C_2 представляет собой конструктивную коаксиальную емкость, заполненную глицерином, и имеет значение около 215 пФ.

Эффективная передача энергии от первичного накопителя C_1 к вторичному накопителю C_2 возможна при равенстве собственных частот первичного и вторичного колебательных контуров трансформатора:

$$L_{1Tr3}C_1 = L_{2Tr3}C_2.$$

Магнитопровод в трансформаторе отсутствует, что приводит к увеличению собственной частоты и, соответственно, скорости набора напряжения на нагрузочной емкости C_2 .

При ударном возбуждении системы двух связанных контуров изменение напряжения на емкости C_2 описывается выражением

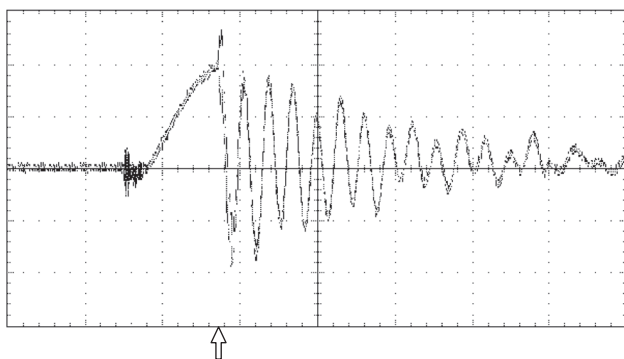


Рис. 3. Осциллограмма напряжения на емкости C_3 . Стрелкой показан момент времени пробоя разрядника P_3 . $U_3 = 175$ кВ/деление. Развертка – 20 нс/деление.

$$U_2 = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{C_1}{C_2}} U_1 \times \left\{ \cos \left[\left(\frac{\omega_0}{\sqrt{1-k}} \right) t \right] - \cos \left[\left(\frac{\omega_0}{\sqrt{1+k}} \right) t \right] \right\}, \quad (1)$$

где $k = M / \sqrt{L_{1Tp3} L_{2Tp3}}$; M – коэффициент взаимной индукции между обмотками трансформатора; $\omega = (L_{1Tp3} C_1)^{1/2} = (L_{2Tp3} C_2)^{1/2}$. При $k = 0.6$ достижение максимального напряжения на емкости C_2 происходит за минимальное количество колебаний [7]. При отсутствии потерь вся энергия емкости C_1 переходит в емкость C_2 , и напряжение на ней определяется как:

$$U_2 = U_1 \sqrt{\frac{C_1}{C_2}} = U_1 \sqrt{\frac{178 \text{ нФ}}{0.215 \text{ нФ}}} = 28.7 U_1.$$

Максимальное значение напряжения $U_2 \approx 220$ кВ достигается на второй полуволне импульса. Период колебаний 1.6 мкс. После пробоя P_2 происходит перезарядка емкости $C_2 \approx 215$ пФ на емкость $C_3 \approx 20$ пФ с периодом $T_3 \approx 160$ нс. Амплитуда напряжения на емкости C_3 определяется напряжением пробоя разрядника P_3 и составляет 350 кВ.

На рис. 3 представлена осциллограмма напряжения на емкости C_3 . Момент пробоя P_3 указан на рисунке стрелкой.

При этом напряжение U_4 на нагрузке и испытуемом объекте (например, на отрезке кабеля) примерно равно напряжению U_3 на емкости C_3 .

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Создан частотный (до 60 Гц) генератор импульсов напряжения в виде затухающей синусоиды с периодом ~ 6 нс, амплитудой первой полуволны напряжения до ~ 400 кВ и добротностью $Q \approx 6$. Генератор имеет малые габариты, автономен – он питается от аккумуляторной батареи (7 А · ч, 36 В). Время непрерывной работы составляет 10 мин. Генератор предназначен для исследований импульсной электропрочности материалов и изделий.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Bokhan P.A., Gugin P.P., Zakrevskii D.E., Lavrukhin M.A., Kazaryan M.A., Lyabin N.A. // Quantum Electronics. 2013. V. 43. № 8. P. 715.
2. Gambaryan V., Starostenko A. // Proc. of 6th Intern. Particle Accelerator Conf. (IPAC 2015). Richmond, Virginia, USA, May 3–8, 2015. Joint Accelerator Conferences Website (JACoW). Paper MOPTY033. P. 1001. <http://accelconf.web.cern.ch/AccelConf/IPAC2015/papers/mopty033.pdf>
3. Морговский Л.Я., Пеликс Е.А. Импульсная рентгенография. Аппараты серии “Арина”. СПб.: ООО “Спектрофлэш”, 1999.
4. Канаев Г.Г., Кухта В.Р., Лопатин В.В., Нашилевский А.В., Ремнев Г.Е., Уетюра К., Фурман Э.Г. // ПТЭ. 2010. № 1. С. 105.
5. Костыря И.Д., Бакшт Е.Х., Тарасенко В.Ф. // ПТЭ. 2010. № 4. С. 84.
6. Сахаров К.Ю. Излучатели сверхкоротких электромагнитных импульсов и методы измерений их параметров. М.: МИЭМ, 2006.
7. Пальчиков Е.И., Рябчун А.М. // ЖТФ. 2016. Т. 86. Вып. 6. С. 121.