

ВЫСОКОЭФФЕКТИВНЫЙ ГЕНЕРАТОР МОЩНЫХ ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ ИМПУЛЬСОВ С МИКРОСЕКУНДНОЙ ДЛИТЕЛЬНОСТЬЮ

© 2021 г. С. В. Коротков^{а,*}, Ю. В. Аристов^а, А. Л. Жмодиков^а, Д. А. Коротков^а

^а Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН
Россия, 194021, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 26

*e-mail: korotkov@mail.ioffe.ru

Поступила в редакцию 25.12.2020 г.

После доработки 07.01.2021 г.

Принята к публикации 09.01.2021 г.

Рассмотрен транзисторный генератор микросекундных импульсов напряжения с амплитудой до 40 кВ, содержащий нестабилизированный источник питания, низковольтный емкостный накопитель энергии и повышающий импульсный трансформатор. Генератор позволяет эффективно рекуперировать энергию, отраженную от нагрузки при резком изменении ее электрического сопротивления, и обеспечивает высокостабильную (разброс менее 5%) величину напряжения зарядки емкостного накопителя (1 кВ), которая не меняется при изменении условий работы от короткого замыкания до холостого хода. Приведены результаты испытаний генератора при частоте следования импульсов выходного напряжения до 1 кГц, показана возможность ее существенного увеличения.

DOI: 10.31857/S0032816221030307

Эффективность электроразрядных технологий, основанных на использовании последовательности мощных и коротких импульсов высокого напряжения, во многом определяется эффективностью генератора импульсов. Основной трудностью при его разработке является возможность резкого изменения электрического сопротивления нагрузки в процессе импульсного воздействия, которое может быть как штатным (обусловленным физическими принципами технологического процесса), так и аварийным. В таких условиях генератор должен сохранять работоспособность, а при штатном резком изменении сопротивления нагрузки он должен обеспечивать требуемые выходные параметры в следующем цикле коммутаций. Выполнение последнего требования является трудной задачей при достаточно высокой частоте следования импульсов.

Современное состояние транзисторной электроники определяет возможность построения таких генераторов на основе низковольтного емкостного накопителя энергии, повышающего импульсного трансформатора с большим коэффициентом трансформации и транзисторного коммутатора, позволяющего пропускать через первичную обмотку трансформатора мощные и короткие импульсы тока разряда емкостного накопителя. Малая длительность и малая амплитуда импульсов

напряжения на первичной обмотке трансформатора обеспечивают ему малые габариты, даже при использовании в первичной обмотке только одного витка. При этом существенно упрощается создание надежной изоляции между обмотками трансформатора.

При резком уменьшении сопротивления нагрузки (например, в момент пробоя электроразрядного реактора) в цепь первичной обмотки трансформатора возвращается значительная часть коммутируемой энергии. Эта энергия обычно поглощается в демпфирующих резисторах или возвращается в источник питания через специальные цепи рекуперации, как, например, показано в [1–4].

На рис. 1 приведена оригинальная схема генератора [5], в которой отраженная от нагрузки энергия рекуперирована в цепь зарядки емкостного накопителя. По этой схеме был изготовлен опытный генератор, позволяющий на частоте 1 кГц коммутировать микросекундные импульсы высокого напряжения с дозированной энергией (~1 Дж).

Генератор работает следующим образом. После зарядки конденсатора C_1 от сети ~220 В включается система управления СУ. Она осуществляет включение и выключение цепей управления силового транзистора T_1 (ДУ) и зарядного транзистора T_2 (ДУ₂). Сначала включается T_1 , а через

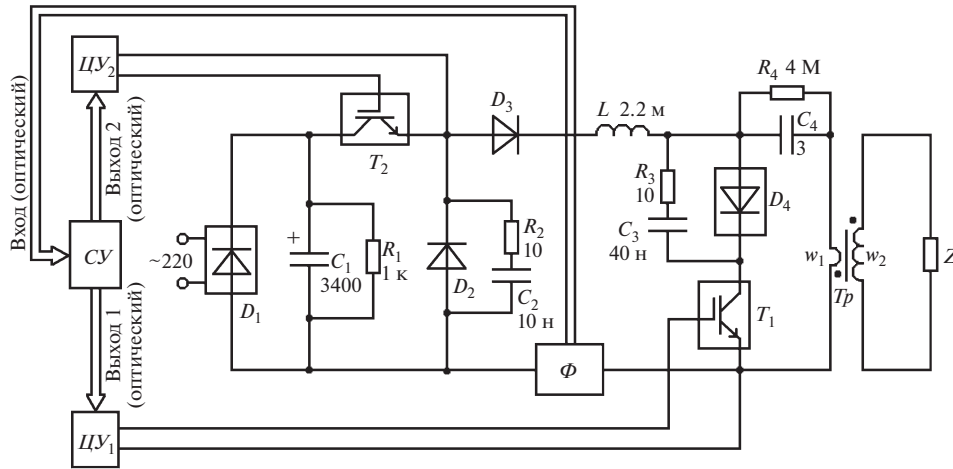


Рис. 1. Электрическая схема генератора. ЦУ – цепь управления, СУ – система управления, Ф – формирователь, Z – нагрузка; T_1 – IRGPS60B120KDP (4 параллельно), T_2 – IRGPS60B120KDP (2 параллельно); D_1 – КВРС3506, D_2, D_3 – 80APF12, D_4 – 80APF12 (2 параллельно); Tp – аморфный пермаллой 9КСР, $180 \times 60 \times 40$ мм, $w_1 = 1, w_2 = 35$.

~200 мкс T_2 . После включения T_2 в цепи $C_1-T_2-D_3-L-D_4-T_1$ начинает нарастать ток I_L . Он измеряется датчиком Холла в формирователе сигнала обратной связи Ф. Так как емкость конденсатора C_1 велика, то ток I_L нарастает практически линейно. В момент, когда он достигает штатного значения, Ф формирует сигнал обратной связи, поступающий в систему управления СУ, которая при этом выключает T_2 , а через 5 мкс – T_1 . В результате накопленная в индуктивности L энергия коммутируется в конденсатор C_4 и обеспечивает его зарядку до штатного напряжения 1 кВ.

Рассмотренный принцип работы генератора обеспечивает высокую стабильность напряжения зарядки конденсатора C_4 , которое определяется только током через индуктивность L в момент выключения T_2 . В результате в конденсаторе C_4 накапливается энергия, которая не зависит от условий разряда C_4 и от пульсаций сетевого напряжения, но может изменяться при настройке формирователя Ф на срабатывание при другой величине I_L .

На рис. 2 приведены эпюры выходных импульсов цепей управления ЦУ₁ (импульс 1) и ЦУ₂

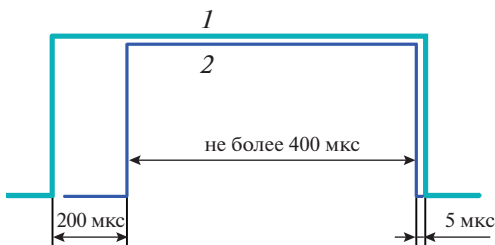


Рис. 2. Выходные импульсы цепей ЦУ₁ (1) и ЦУ₂ (2).

(импульс 2). Спад импульса 2 формируется по сигналу обратной связи с формирователя Ф. Чтобы исключить возможность нарастания тока через индуктивность L до чрезмерно большой величины в аварийном режиме (обрыв в цепи преобразователя Ф или отключение сети питания), максимальная длительность импульса 2 ограничена на уровне 400 мкс. При возникновении такого аварийного режима транзистор T_1 не выключается, а выключается только T_2 . В результате ток I_L замыкается по цепи $D_4-T_1-D_2-D_3$ и медленно затухает по мере рассеивания энергии, запасенной в индуктивности L . В этих условиях система управления СУ останавливает работу генератора.

Следующее включение T_1 происходит через 1 мс, что соответствует частоте 1 кГц. При этом в первичную обмотку w_1 повышающего трансформатора Tp коммутируется ток разряда конденсатора C_4 и через обмотку w_2 протекает короткий выходной ток I_Z , обеспечивающий формирование на нагрузке Z импульса высокого напряжения. В штатном режиме параметры выходной цепи генератора согласованы с сопротивлением нагрузки. При этом на нагрузке формируется униполярный импульс напряжения и конденсатор C_4 полностью разряжается.

Если при коммутации тока I_Z сопротивление Z резко уменьшается, то это приводит к существенной перезарядке конденсатора C_4 . Затем он перезарядается повторно до напряжения исходной полярности по цепи $w_1-D_2-D_3-L$. В процессе повторной перезарядки C_4 транзистор T_1 не выключается, поэтому в момент достижения исходной полярности напряжения на C_4 протекающий че-

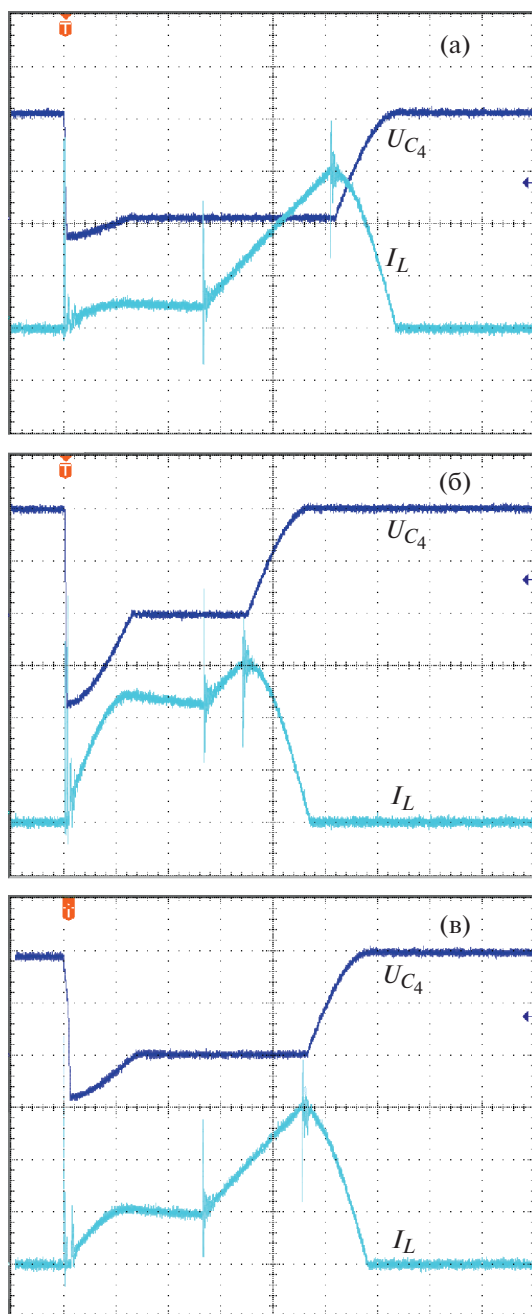


Рис. 3. Осциллограммы тока через индуктивность L (I_L) и напряжения на конденсаторе C_4 (U_{C_4}) при $Z = 750$ Ом (а), 10 Ом (б) и 10 кОм (в). Масштаб по вертикали: тока – 10 А/деление, напряжения – 500 В/деление; по горизонтали – 100 мкс/деление.

рез индуктивность L ток коммутируется в цепь D_4-T_1 . Так как потери энергии в этой цепи малы, то ток через индуктивность L практически не изменяется до момента включения транзистора T_2 .

При включении T_2 диод D_2 выключается и конденсатор C_1 разряжается по цепи T_2-D_3-L-

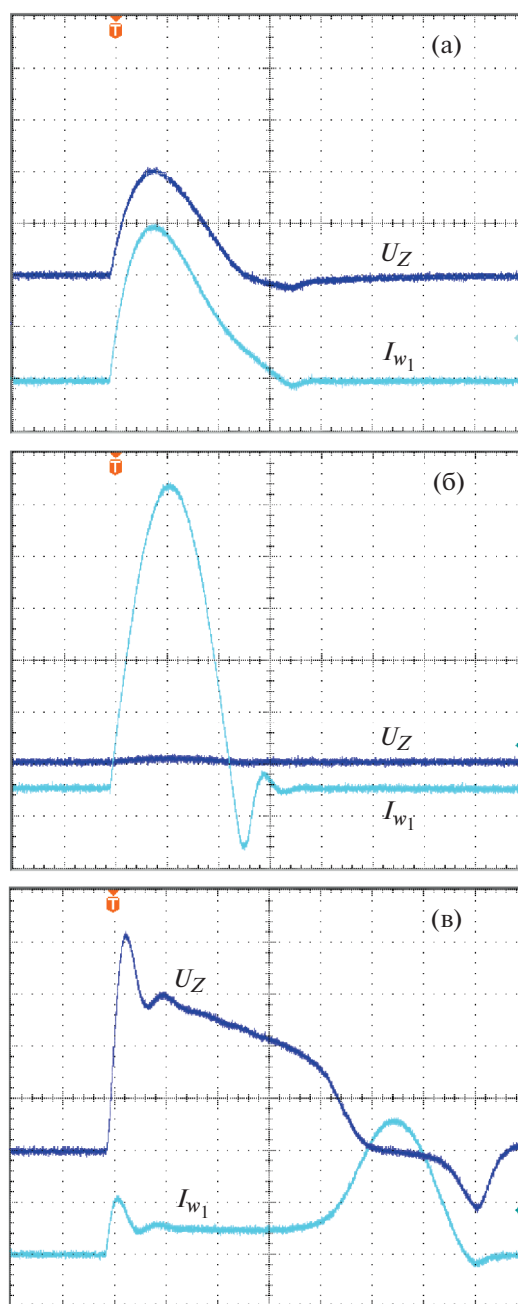


Рис. 4. Осциллограммы тока I_{w_1} через первичную обмотку трансформатора T_p и напряжения на нагрузке U_Z при $Z = 750$ Ом (а), 10 Ом (б) и 10 кОм (в). Масштаб по вертикали: тока – 250 А/деление, напряжения – 10 кВ/деление; по горизонтали – 2 мкс/деление.

D_4-T_1 до момента поступления в $СУ$ сигнала обратной связи с формирователя Φ . В момент поступления этого сигнала $СУ$ выключает T_1 (а затем T_2), что обеспечивает зарядку C_4 до штатного напряжения, определяемого величиной тока, протекающего через индуктивность L .

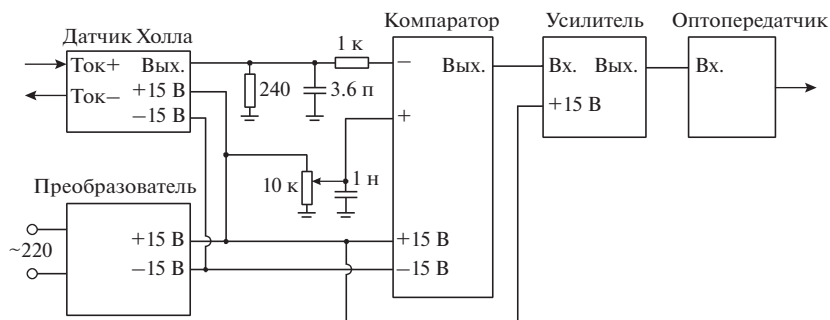


Рис. 5. Схема формирователя сигналов обратной связи.

Если при коммутации выходного тока I_Z сопротивление нагрузки становится значительно выше штатного значения, то существенно увеличивается длительность выходного импульса. Так как трансформатор Tr не может ее обеспечить, то его сердечник насыщается. После насыщения сердечника индуктивность первичной обмотки Tr резко уменьшается, что приводит к быстрой перезарядке C_4 через обмотку w_1 . В дальнейшем генератор работает так же, как и в ранее описанном режиме с режимом уменьшением сопротивления нагрузки. В результате обеспечивается зарядка C_4 до штатного напряжения рабочей полярности.

Осциллограммы на рис. 3 и 4 иллюстрируют работу генератора на частоте 500 Гц при использовании в качестве нагрузки Z резисторов с разной величиной сопротивления.

На рис. 3а, 3б, 3в приведены осциллограммы тока через индуктивность L (I_L) и напряжения на конденсаторе C_4 (U_{C_4}) при сопротивлении нагрузки 750 Ом, 10 Ом, 10 кОм соответственно.

Как видно из осциллограмм на рис. 3, напряжение зарядки конденсатора C_4 ($U_{C_4} = 1$ кВ) практически не изменяется при существенном изменении сопротивления Z . В результате строго дозируется энергия, передаваемая в цепь нагрузки Z при следующем акте коммутации.

На рис. 4а, 4б и 4в представлены осциллограммы тока I_{w_1} через первичную обмотку трансформатора Tr и напряжения на нагрузке U_Z при сопротивлении нагрузки соответственно 750 Ом, 10 Ом и 10 кОм.

Как видно из осциллограмм на рис. 4, в режиме, близком к короткому замыканию ($Z = 10$ Ом), напряжение на нагрузке очень мало, а амплитуда тока I_{w_1} близка к 1.5 кА. В режиме, близком к “холостому ходу” ($Z = 10$ кОм), ток I_{w_1} в первые моменты коммутации мал, а напряжение на нагрузке достигает 40 кВ. Такое высокое напряжение приводит к быстрому насыщению сердечника Tr .

В результате ток I_{w_1} резко нарастает, а напряжение U_Z быстро снижается. Так как в рассмотренных режимах после коммутации тока в нагрузку напряжение на конденсаторе C_4 восстанавливается до штатного значения (см. рис. 3), то величина выходной энергии генератора не изменяется.

Рассмотренное достоинство генератора очень важно при его использовании в устройствах, физические принципы работы которых предполагают резкое изменение сопротивления нагрузки.

На рис. 5 приведена функциональная схема формирователя сигнала обратной связи Φ , который определяет момент выключения транзистора T_1 . По этому сигналу происходит высокостабильный обрыв тока через индуктивный накопитель L на заданном уровне. Нестабильность по току обрыва $< 5\%$.

Формирователь содержит преобразователь сетевого напряжения, датчик Холла ЛАН 50-Р и компаратор на операционных усилителях LF411, который сравнивает опорный сигнал с сигналом от датчика Холла и при их равенстве генерирует выходной сигнал в усилитель на микросхеме МС4452. Связь с СУ осуществляется с помощью оптопередатчика HFBR-1522.

Генератор был использован в устройстве электроразрядной обработки воды для проведения биологических исследований. В экспериментах он обеспечивал формирование импульсов разрядного тока с амплитудой в несколько сотен ампер на частоте до 500 Гц.

Принцип действия рассмотренного генератора позволяет существенно повысить коммутируемую энергию, амплитуду импульсов выходного напряжения и частоту следования выходных импульсов. Коммутируемая энергия определяется энергией, накапливаемой в индуктивности L , и может быть увеличена при увеличении L или тока через L . Амплитуду выходного напряжения можно повысить при увеличении коэффициента трансформации Tr . Предельная частота генератора определяется возможностями транзисторов,

которые допускают работу на частотах в десятки килогерц.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Грехов И.В., Коротков С.В., Андреев А.Г., Козлов А.К., Рольник И.А., Яковчук Н.С. // ПТЭ. 1996. № 3. С. 115.
2. Грехов И.В., Коротков С.В., Андреев А.Г., Козлов А.К., Рольник И.А., Степаняни А.Л. // ПТЭ. 1997. № 5. С. 128.
3. Коротков С.В., Аристов Ю.В., Козлов А.К., Коротков Д.А., Рольник И.А. // ПТЭ. 2011. № 2. С. 47.
4. Коротков С.В., Андрианова М.Ю., Козлов А.К., Коротков Д.А., Спичкин Г.Л. // ПТЭ. 2019. № 4. С. 109. <https://doi.org/10.1134/S0032816219030212>
5. Коротков С.В., Аристов Ю.В., Жмодиков А.Л. Патент на полезную модель 179088 РФ // Оpubл. 26.04.2018. Бюл. 12.