

ГЕНЕРАТОР С ИНВЕРСИЕЙ НАПРЯЖЕНИЯ И УДВОЕНИЕМ АМПЛИТУДЫ ВЫХОДНЫХ ИМПУЛЬСОВ

© 2011 г. Н. Г. Мутницкий, В. В. Татур

Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН

Россия, 634055, Томск, просп. Академический, 10/3

E-mail: tatur@imces.ru

Поступила в редакцию 14.02.2011 г.

Описывается генератор с инверсией напряжения на накопительных емкостях и удвоением амплитуды выходных импульсов на нагрузке без увеличения количества каскадов и повышения питающего напряжения. В качестве коммутаторов в схеме использованы IGBT-транзисторы. Особенностью схемного решения генератора является замена зарядных резисторов на зарядные диоды и подключение питающего напряжения через индуктивность. Приведены функциональная и экспериментальная схемы, а также результаты измерений.

В настоящее время широко используется генератор импульсов высокого напряжения, собранный по схеме Аркадьева–Маркса [1–4]. Новые технические решения с применением современной элементной базы позволили значительно улучшить его энергетические характеристики.

Кроме импульсных генераторов с умножением напряжения по схеме Аркадьева–Маркса, известны генераторы с использованием других методов умножения. R.A. Fitch и V.T.S. Howell [5] предложили импульсный генератор с применением умножения и дополнительной инверсией напряжения на накопительных конденсаторах.

Суть этого технического решения заключается в следующем. От источника постоянного напряжения U_0 через сопротивления определенным способом заряжаются накопительные емкости C . Две соседние емкости заряжаются с противоположной полярностью. Если число емкостей четное, то из-за разной полярности напряжения на соседних емкостях суммарное напряжение на них будет равно нулю. Параллельно каждой нечетной емкости подключена перезарядная индуктивность L , образуя, таким образом, LC -контур. При одновременном замыкании ключей в LC -контурах начнется колебательный процесс, и через определенное время произойдет перезаряд емкостей, вследствие чего суммарное напряжение на выходе составит $2nU_0$ (n – число каскадов, $2n$ – число емкостей). Если в этот момент времени замкнуть общий ключ генератора, то все напряжение $2nU_0$ будет приложено к нагрузке.

Такое техническое решение иногда оказывается предпочтительнее схемы Аркадьева–Маркса, так как выходной ток не протекает через большое количество силовых ключей [6]. Однако коэффициент полезного действия зарядного контура в

такой схеме, так же как и в схеме Аркадьева–Маркса остается низким: во время заряда на резисторах рассеивается до 50% мощности, потребляемой от источника питания.

Также известен генератор высоковольтных импульсов [7], в котором основной целью является увеличение коэффициента умножения без увеличения числа каскадов умножения. В генераторе накопительные емкости заряжаются через зарядное сопротивление и, как следствие, процесс заряда сопровождается потерями энергии и невозможностью зарядить эти емкости до удвоенного напряжения источника питания. Далее осуществляется перезаряд накопительных емкостей через дополнительные индуктивности. Дополнительные индуктивности и накопительные емкости должны быть подобраны в определенных соотношениях. При таких условиях возможен колебательный процесс, в результате которого суммарное напряжение на емкостях может быть на 35–40% больше, чем в других аналогичных схемах.

Однако, как указывает сам автор, точный расчет параметров схемы для большого числа каскадов умножения практически невозможен, а, кроме того, временная и температурная нестабильности подобранных элементов будут приводить к разбалансировке схемы и, как следствие, к уменьшению выходного напряжения.

В работе [8] авторами предложено техническое решение, позволившее значительно повысить коэффициент полезного действия зарядного контура в схеме Аркадьева–Маркса, а также получить удвоение выходного напряжения. Такое решение может быть применено и в схеме с инверсией напряжения [5].

В данной работе представлен генератор с инверсией напряжения и удвоением амплитуды вы-

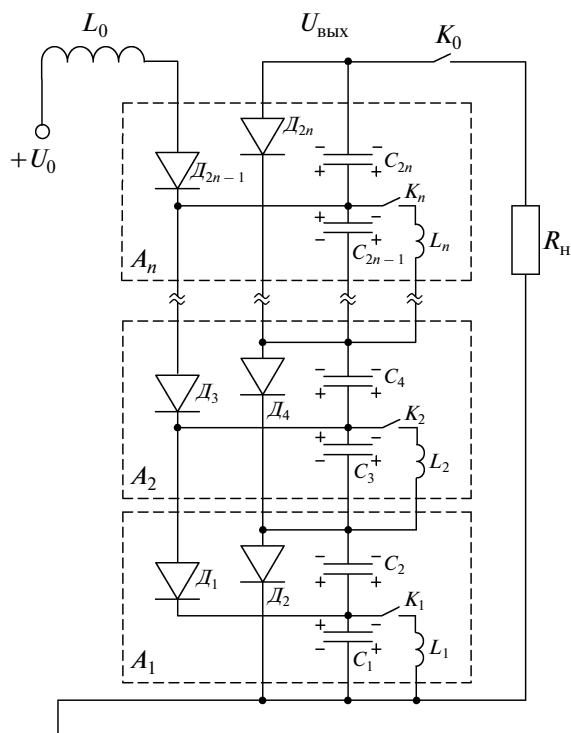


Рис. 1. Функциональная схема генератора. $C_1 = C_2 = \dots = C_{2n} = C$; $L_1 = L_2 = \dots = L_n = L$.

ходных импульсов с повышенным коэффициентом полезного действия. Функциональная схема генератора показана на рис. 1. Отличием описываемой схемы является замена зарядных резисторов на зарядные диоды и подключение питающего напряжения через индуктивность L_0 .

Схема разбита на n однотипных каскадов $A_1 - A_n$. Каскад A_1 включает в себя накопительные емкости C_1 и C_2 , коммутирующий ключ K_1 , зарядные диоды D_1, D_2 и перезарядную индуктивность L_1 . Аналогично каскаду A_1 выполнены и все остальные.

Генератор работает следующим образом. От питающего напряжения $+U_0$ осуществляется заряд накопительных емкостей по цепи: индуктивность L_0 , нечетная цепочка зарядных диодов $D_1 - D_{2n-1}$, емкости $C_1 - C_{2n}$, четная цепочка зарядных диодов $D_2 - D_{2n}$. Так как во время заряда все диоды открыты, то накопительные емкости соединены параллельно и процесс их резонансного заряда происходит одновременно.

Как было показано в работе [8], каждая из емкостей в такой схеме заряжается с минимальными потерями до двойного напряжения питания $U_c = 2U_0$ (полярность напряжения на рис. 1 показана слева от емкостей). После заряда накопительных емкостей зарядные диоды запираются и удерживают напряжение на них на уровне $U_c = 2U_0$. По-

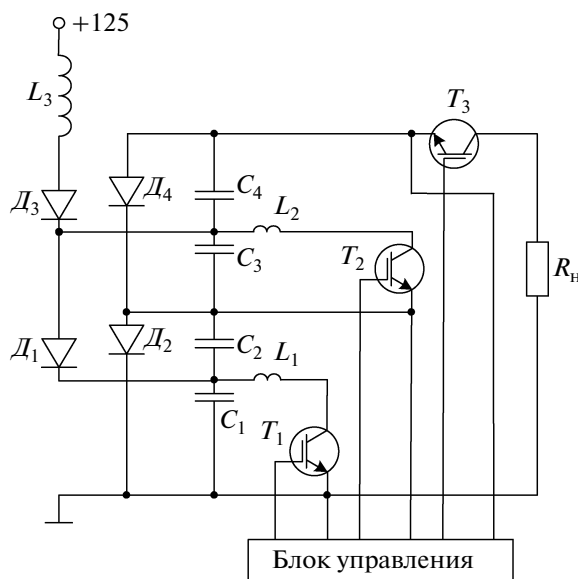


Рис. 2. Экспериментальная схема генератора. $T_1 - T_3 -$ IRG4PH50U; $D_1 - D_4 -$ HFA06TB06; $C_1 - C_4 -$ K78-2-1600B-6,8 нФ; $L_1, L_2 -$ Д1-0.6-6 \pm 5%; $L_3 -$ 40 мГн (феррит N87 ETD59, зазор 0.2 мм, 150 витков); $R_н -$ TBO10-56 Ом.

скольку число емкостей четное, то из-за разной полярности напряжения на соседних емкостях суммарное напряжение на них будет равно нулю.

При одновременном замыкании ключей $K_1 - K_n$ в LC-контуре начнется колебательный процесс, и через время $\pi\sqrt{LC}$ произойдет перезаряд емкостей, вследствие чего напряжение на выходе всех, теперь уже последовательно соединенных емкостей составит $U_{\text{вых}} = 2U_0 2n = 4nU_0$. Полярность напряжения на емкостях после перезаряда нечетных емкостей показана справа от них.

Если в этот момент времени замкнуть ключ K_0 , то все напряжение $4nU_0$ будет приложено к нагрузке $R_н$. Вся энергия, накопленная в емкостях, будет передана нагрузке в том случае, если время изменения напряжения на емкостях в результате колебательного процесса в LC-контуре будет много больше постоянной времени разряда емкости $C/2n$ на сопротивление $R_н$ ($C/2n -$ емкость накопительных конденсаторов, соединенных последовательно).

В процессе перезаряда нечетных емкостей и разряда емкостей на нагрузку все зарядные диоды, кроме диода D_{2n-1} , остаются закрытыми и не оказывают влияния на выходное напряжение. Диод D_{2n-1} в процессе перезаряда нечетных емкостей открывается, и напряжение UC_{2n-1} прикладывается к индуктивности L_0 . Так как индуктивность L_0 велика и за время перезаряда и дальнейшего разряда накопительных емкостей утечки

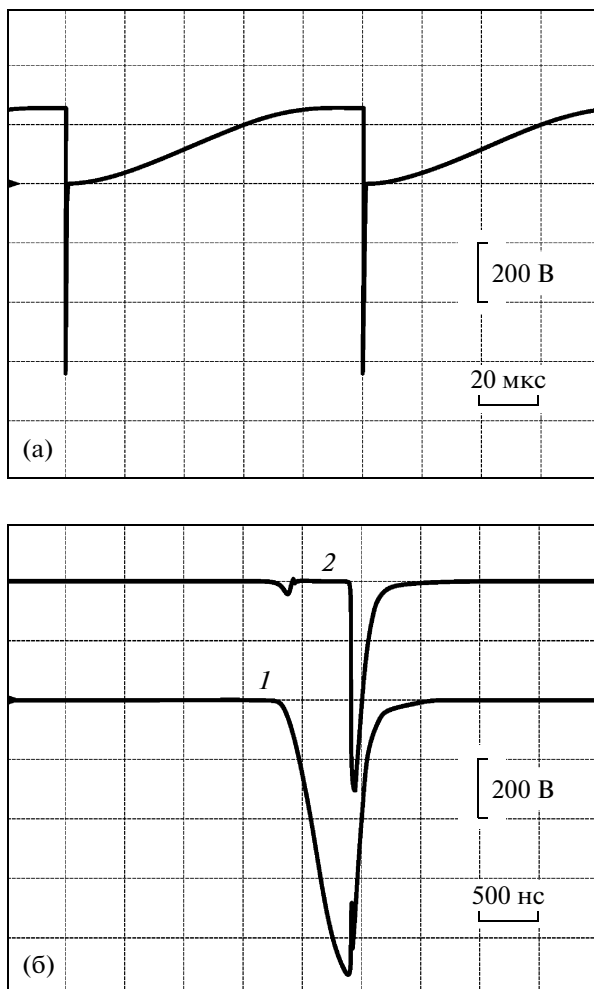


Рис. 3. Осциллограммы напряжения: а – на накопительной емкости C_3 ; б – на накопительной емкости C_4 (кривая 1) и на нагрузке (кривая 2).

тока по этой цепи не происходит, то эта цепь также не оказывает влияния на выходное напряжение. После разряда накопительных емкостей на нагрузку ключи закрываются, а диоды открываются, и процесс полностью повторяется.

Экспериментальные измерения проводились на двух каскадах по схеме, представленной на рис. 2. Питающее напряжение выбрано $U_0 = +125$ В, при этом расчетное выходное напряжение должно быть $U_{\text{вых}} = 4nU_0 = 4 \cdot 2 \cdot 125 = 1000$ В. В качестве ключей K_0 и K_n используются IGBT-транзисторы. Частота повторения импульсов выбрана около 10 кГц. Транзисторы управляются сигналами с блока управления. В качестве нагрузки использовался резистор $R_n = 56$ Ом.

Осциллограммы напряжений в схеме представлены на рис. 3. Процесс заряда на нечетных накопительных емкостях имеет одинаковую форму и амплитуду, близкую к удвоенному напряжению источника питания, т.е. ~ 250 В, что говорит о малых потерях во время заряда. После открывания транзисторов T_1 и T_2 происходит перезаряд нечетных емкостей, и на осциллограмме мы наблюдаем импульс отрицательной полярности. На емкости C_1 этот импульс имеет амплитуду, близкую к напряжению $2U_0$ за вычетом потерь на транзисторе T_1 . На емкости C_3 этот импульс имеет амплитуду, близкую к суммарному напряжению на емкостях C_1-C_3 , т.е. $6U_0$ за вычетом потерь при перезаряде на транзисторах T_1 и T_2 . На рис. 3а приведена осциллограмма напряжения на емкости C_3 . На четных емкостях при заряде напряжение не меняется, при перезаряде формируется отрицательный импульс амплитудой $4U_0$ на емкости C_2 и амплитудой $8U_0 = U_{\text{вых}}$ на емкости C_4 за вычетом потерь на транзисторах T_1 и T_2 . На рис. 3б показаны напряжения на накопительной емкости C_4 (кривая 1) и на нагрузке (кривая 2). Реальная амплитуда напряжения на конденсаторе C_4 составила $U_{\text{вых}} = 900$ В, а на нагрузке $U_n = 700$ В.

Таким образом, показана принципиальная возможность получения удвоенной амплитуды импульсов на нагрузке в схеме с инверсией напряжения без увеличения количества каскадов и повышения питающего напряжения, а также приведены экспериментальные данные, подтверждающие обоснованность представленных технических решений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Месяц Г.А. Генерирование мощных наносекундных импульсов. М.: Сов. радио, 1974. С. 213.
2. Fazio M.V., Kirbie H.C. // Proc IEEE. 2004. V. 92. P. 1197.
3. Воеводин С.В., Горохов В.В., Карелин В.И. // ПТЭ. 2000. № 3. С. 67.
4. Зенкин Д.И., Козлов С.Г., Куропаткин Ю.П. и др. // ПТЭ. 2008. № 3. С. 76.
5. Fitch R.A., Howell V.T.S. // Proc. IEEE. Electronics Power Science and General. 1964. V. III. № 4. P. 849.
6. Коротков С.В., Аристов Ю.В., Воронков В.Ю. // ПТЭ. 2010. № 2. С. 80.
7. Запольский А.Ф. А.с. № 1131438 РФ. МПК H03K3/53 // Бюл. № 31. 1998. С. 368.
8. Мутницкий Н.Г., Татур В.В. // ПТЭ. 2010. № 5. С. 80.