

УДК 621.314.5

ГЕНЕРАТОРЫ ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ ИМПУЛЬСОВ С УДВОЕНИЕМ ВЫХОДНОГО НАПРЯЖЕНИЯ

В.В. Татур

Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН, г. Томск

E-mail: tatur@imces.ru

Представлены многокаскадные генераторы высоковольтных импульсов с удвоением выходного напряжения, выполненные по схеме Аркадьева–Маркса и схеме с инверсией напряжения, предложенной Р. Фитчем и В. Говеллом. Особенностью схемного решения генераторов является замена зарядных резисторов на зарядные диоды и подключение питающего напряжения через общую индуктивность. Такое решение позволило получить на нагрузке удвоенную амплитуду импульсов, а также минимизировать потери мощности во время заряда накопительных конденсаторов.

Ключевые слова:

Генератор импульсов, удвоение напряжения, накопительный конденсатор, цепь заряда.

Key words:

Pulse generator, voltage doubling, storage capacitor, charging circuit.

Принцип действия генератора импульсов высокого напряжения по классической схеме Аркадьева–Маркса основан на заряде накопительных конденсаторов, соединенных параллельно, до напряжения, близкого к напряжению источника питания. После заряда эти конденсаторы соединяются последовательно при помощи различных коммутирующих устройств. Выходное напряжение на нагрузке увеличивается пропорционально количеству последовательно соединенных конденсаторов [1–3]. В качестве коммутирующих устройств длительное время использовались газоразрядные приборы [1], в том числе воздушные разрядники [2], а также полупроводниковые тиристоры и транзисторы [3]. В генераторе заряд накопительных конденсаторов осуществляется через две ветви последовательно соединенных резисторов. Во время заряда на резисторах рассеивается до 50 % мощности, потребляемой от источника питания, что заметно снижает КПД устройства.

В настоящее время в связи с использованием IGBT-транзисторов в качестве коммутирующих устройств схема Аркадьева–Маркса находит все большее применение. В публикациях [4–6] заряд накопительных конденсаторов осуществляется через две ветви последовательно соединенных индуктивностей и цепь последовательно соединенных диодов. Такое техническое решение позволило уменьшить потери мощности во время заряда накопительных конденсаторов.

В патенте [7] и публикации [8] показано, что часть накопительных конденсаторов заряжается через общую индуктивность и две цепи последовательно соединенных диодов. Кроме того, в этой схеме имеются еще две зарядные цепи. Сложный характер заряда накопительных конденсаторов приводит к значительным колебательным процессам в схеме и, как следствие, требует дополнительных цепей защиты. При этом возрастают потери мощности.

Во всех вариантах схемы Аркадьева–Маркса амплитуда напряжения на нагрузке равна напряжению источника питания, умноженному на коли-

чество накопительных конденсаторов, за вычетом потерь на коммутирующих элементах.

Генератор с удвоением выходного напряжения по схеме Аркадьева–Маркса

В работе использован генератор высоковольтных импульсов с удвоением выходного напряжения, выполненный по схеме Аркадьева–Маркса [9]. Функциональная схема генератора показана на рис. 1. В качестве коммутирующих элементов использованы IGBT-транзисторы. Особенностью предложенного схемного решения является замена зарядных резисторов на зарядные диоды и подключение питающего напряжения через общую индуктивность L .

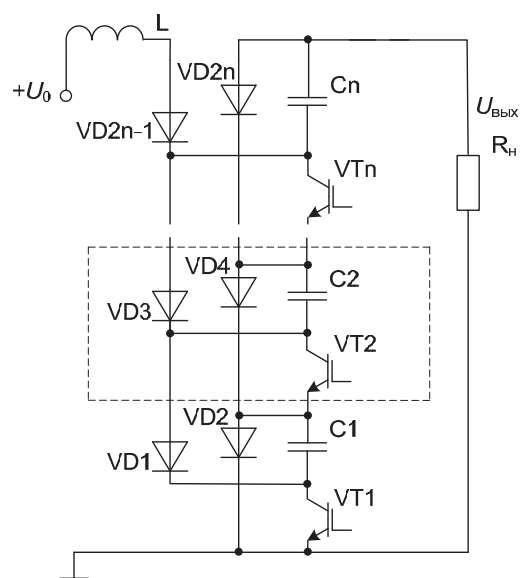


Рис. 1. Функциональная схема генератора. $C1-Cn$ – K78–2–1600В–3,3 нФ; $VT1-VTn$ – IRG4PH50U; $VD1-VDn$ – HFA06TB120; L – 25 мГн (феррит N87 ETD59, зазор 0,8 мм, 150 витков); R_n – 400 Ом

Генератор высоковольтных импульсов состоит из n каскадов и работает следующим образом. От питающего напряжения $+U_0$ осуществляется за-

ряд накопительных конденсаторов по цепи: индуктивность L , нечетная цепочка зарядных диодов $VD1-V D2n-1$, конденсаторы $C1-Cn$, четная цепочка зарядных диодов $VD2-V D2n$. Так как во время заряда все диоды открыты, то накопительные конденсаторы соединены параллельно, процесс заряда конденсаторов происходит одновременно.

Эквивалентная схема цепи заряда накопительных конденсаторов показана рис. 2.

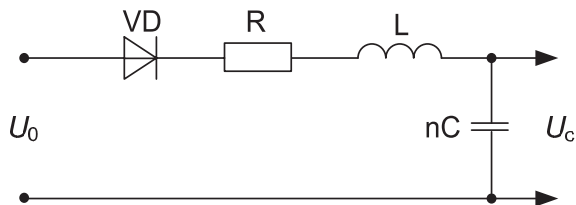


Рис. 2. Эквивалентная схема цепи заряда накопительных конденсаторов. L – зарядная индуктивность; R – активное сопротивление зарядной цепи; VD – зарядный диод; C – ёмкость накопительного конденсатора; n – количество каскадов

Особенности заряда накопительных конденсаторов аналогичной эквивалентной схемы подробно рассмотрены в работе [10]. При $R \rightarrow 0$ в такой схеме будем происходить колебательный режим заряда накопительных конденсаторов. Такой режим заряда накопительных конденсаторов является наиболее выгодным с точки зрения минимизации потерь мощности и позволяет зарядить каждый конденсатор до удвоенного напряжения питания $U_c = 2U_0$.

После заряда накопительных конденсаторов зарядные диоды запираются и удерживают напряжение на конденсаторах на уровне U_c . Далее на затворы транзисторов $VT1-V Tn$ поступают отпирающие импульсы. Транзисторы открываются и конденсаторы $C1-Cn$, соединяясь последовательно, разряжаются на нагрузку R_n . На нагрузке формируется напряжение амплитудой $U_{\text{вых}} = 2nU_0$.

В процессе разряда конденсаторов на нагрузку все зарядные диоды, кроме $VD2n-1$, остаются закрытыми и не оказывают влияния на выходное на-

пряжение. Диод $VD2n-1$ в момент открывания транзисторов также открывается и напряжение с коллектора транзистора VTn прикладывается к индуктивности L . Так как индуктивность L велика и за время разряда накопительных конденсаторов утечки тока по этой цепи не происходит, то эта цепь также не оказывает влияния на выходное напряжение. После разряда накопительных конденсаторов на нагрузку транзисторы закрываются, а диоды открываются, и процесс полностью повторяется.

Эксперимент проводился на десяти каскадах, в которых использовались накопительные конденсаторы емкостью 3,3 нФ. Частота повторения импульсов f выбрана около 10 кГц. Мощность, потребленная от источника питания $U_0 = 500$ В, составила $P_0 = 175$ Вт. Мощность, запасенная в конденсаторах и переданная в нагрузку, может быть рассчитана по формуле $P_c = CnU_c^2 f / 2$. При напряжении $U_c = 1000$ В, она равна $P_c = 165$ Вт. Таким образом, потери в зарядной цепи составили 10 Вт, что соответствует 5,7 %.

Осциллограммы напряжений на накопительных конденсаторах $C1$ и $C2$ (соответственно и на коллекторах транзисторов $VT1$ и $VT2$) показаны на рис. 3. Процесс заряда всех накопительных конденсаторов одинаков, а в момент открывания транзисторов на коллекторе транзистора $VT2$ наблюдается импульс напряжения отрицательной полярности, соответствующий напряжению, до которого зарядился конденсатор $C1$, за вычетом падения напряжения на открытых транзисторах $VT1$ и $VT2$. На коллекторах последующих транзисторов амплитуда напряжения отрицательного импульса будет соответственно увеличиваться.

Осциллограммы напряжения и тока на активной нагрузке $R_n = 400$ Ом показаны на рис. 4. В качестве активной нагрузки использовались четыре резистора типа ТВО-60-100 Ом соединенных последовательно. Реальная амплитуда напряжения составила 7,4 кВ, а амплитуда тока соответствен-

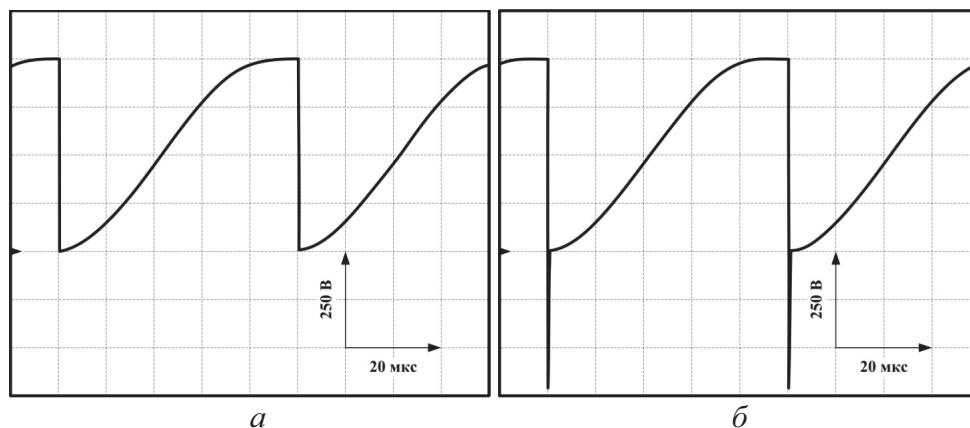


Рис. 3. Осциллограммы напряжения на накопительном конденсаторе: а) $C1$; б) $C2$

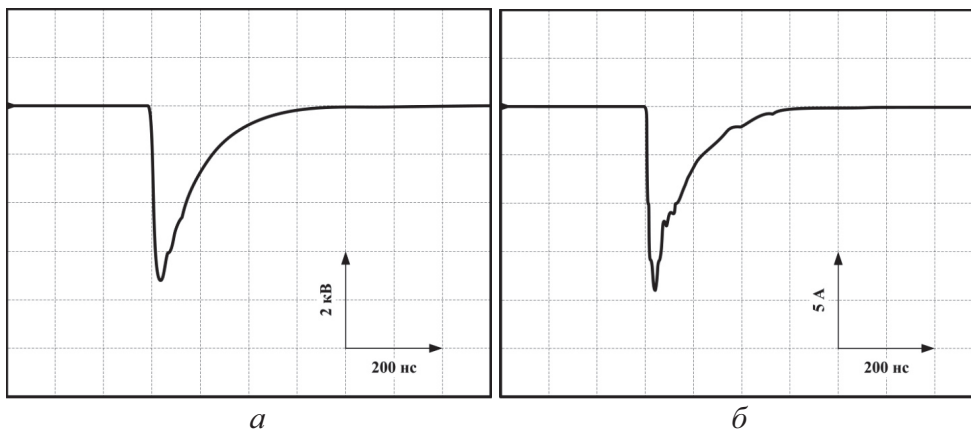


Рис. 4. Осциллограммы: а) напряжение на нагрузке; б) ток в нагрузке

Генератор с удвоением выходного напряжения по схеме Р. Фитча и В. Говелла

Кроме импульсных генераторов с умножением напряжения по схеме Аркадьева–Маркса известны генераторы с использованием других методов умножения. Р. Фитч и В. Говелл [11] предложили импульсный генератор с применением умножения и дополнительной инверсией напряжения на накопительных конденсаторах.

Такое техническое решение иногда оказывается предпочтительнее схемы Аркадьева–Маркса, так как выходной ток в данном случае не протекает через большое количество силовых ключей. Однако КПД зарядного контура в такой схеме, так же как и в схеме Аркадьева–Маркса, остается низким.

Техническое решение заряда накопительных конденсаторов, описанное выше, может быть применено и в схеме с инверсией напряжения, предложенной Р. Фитчем и В. Говеллом [12]. Функциональная схема генератора с инверсией напряжения и удвоением амплитуды выходных импульсов показана на рис. 5.

Как было показано выше, каждый из конденсаторов в такой схеме зарядится с минимальными потерями до двойного напряжения питания $U_c=2U_0$. Полярность напряжения показана слева от конденсаторов. После заряда накопительных конденсаторов зарядные диоды запираются и удерживают напряжение на них на уровне $U_c=2U_0$. Схема состоит из n каскадов, каждый каскад имеет по два конденсатора заряженных встречно. Поскольку общее число конденсаторов четное, то из-за разной полярности напряжения на соседних конденсаторах суммарное напряжение на них будет равно нулю. Далее при одновременном включении транзисторов VT_1-VT_n в LC-контуре каждого каскада начнется колебательный процесс и через время $\pi\sqrt{LC}$ произойдет перезаряд нечетных конденсаторов, вследствие чего напряжение на выходе всех, теперь уже последовательно соединенных конденсаторов, составит $4nU_0$. Полярность напряжения на конденсаторах после перезаряда нечетных конденсаторов показана справа от них. Если в этот момент времени открыть транзистор VT_0 ,

то все напряжение $4nU_0$ будет приложено к нагрузке R_H .

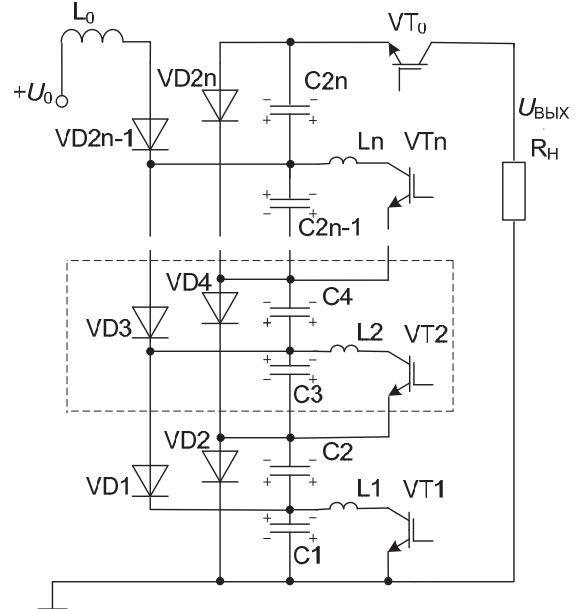


Рис. 5. Функциональная схема генератора. VT_0-VT_n – IRG4PH50U; VD_1-VD_n – HFA06TB06; C_1-C_n – K78-2-1600B-6,8 нФ; L_1-L_n – Д1-5-6±5%; L_0 – 40 мГн (феррит N87 ETD59, зазор 0,2 мм, 150 витков); R_H – TBO-10-56 Ом

В процессе перезаряда нечетных конденсаторов и разряда этих конденсаторов на нагрузку все зарядные диоды, кроме диода VD_{2n-1} , остаются закрытыми и не оказывают влияния на выходное напряжение. Диод VD_{2n-1} в процессе перезаряда нечетных конденсаторов открывается, и напряжение $4nU_0$ за вычетом напряжения на конденсаторе C_{2n} прикладывается к индуктивности L_0 . Так как индуктивность L_0 велика и за время перезаряда и дальнейшего разряда накопительных конденсаторов на нагрузку утечки тока по этой цепи не происходит, то эта цепь также не оказывает влияния на выходное напряжение. После разряда накопительных конденсаторов на нагрузку все транзисторы закрываются, а диоды открываются, и процесс полностью повторяется.

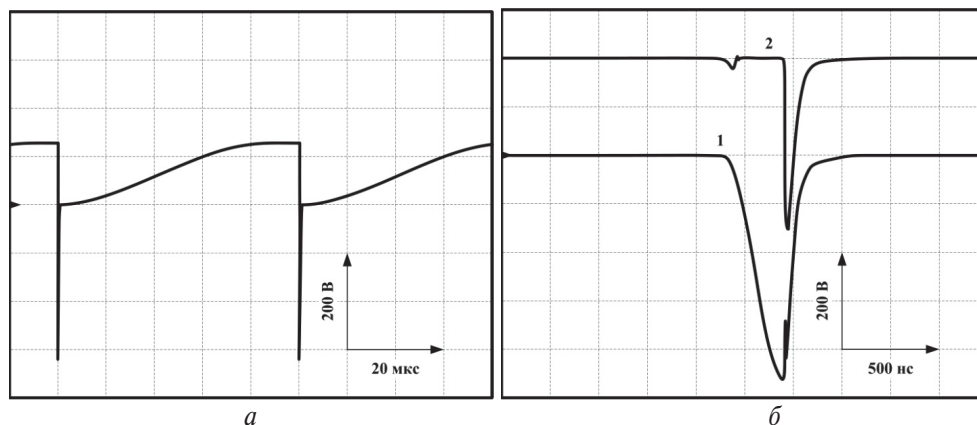


Рис. 6. Осциллограммы напряжения на накопительном конденсаторе: а) С3; б) С4 (кривая 1) и нагрузке (кривая 2)

Экспериментальные измерения проводились на двух каскадах. Питающее напряжение выбрано $U_0=125$ В, при этом расчетное выходное напряжение должно быть $U_n=4nU_0=4 \times 2 \times 125=1000$ В. Осциллограммы напряжений в схеме представлены на рис. 6. Процесс заряда на нечетных накопительных конденсаторов имеет одинаковую форму и амплитуду, близкую к удвоенному напряжению источника питания, т. е. около 250 В, что говорит о малых потерях во время заряда. После открывания транзисторов VT1 и VT2 происходит процесс перезаряда нечетных конденсаторов, и на осциллограмме мы наблюдаем импульс отрицательной полярности.

На емкости С1 этот импульс имеет амплитуду, близкую к напряжению $2U_0$ за вычетом потерь на транзисторе VT1. На емкости С3 этот импульс имеет амплитуду, близкую к суммарному напряжению на емкостях С1–С3, т. е. $6U_0$ за вычетом потерь при перезаряде на транзисторах VT1 и VT2. На рис. 6, а приведена осциллограмма напряжения на конденсаторе С3. На четных емкостях при заряде напряжение не меняется, при перезаряде фор-

мируется отрицательный импульс амплитудой $4U_0$ – на конденсаторе С2 и амплитудой $8U_0$ – на конденсаторе С4 за вычетом потерь на транзисторах VT1 и VT2.

На нагрузке, после отпирания транзистора VT₀, формируется аналогичное напряжение за вычетом потерь на транзисторах VT₀, VT1 и VT2. На рис. 6, б показаны напряжения на накопительном конденсаторе С4 (кривая 1) и на нагрузке (кривая 2). Реальная амплитуда напряжения на конденсаторе С4 составила $U_{C4}=900$ В, а на нагрузке $U_n=700$ В.

Выводы

Показана принципиальная возможность удвоения напряжения на нагрузке в схемах Аркадьева–Маркса и Фитча–Говелла с инверсией напряжения за счет замены зарядных резисторов на зарядные диоды и подключения питающего напряжения через общую индуктивность. Дано обоснование повышения КПД зарядных цепей, приведены экспериментальные данные, подтверждающие обоснованность предложенных технических решений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Месяц Г.А. Генерирование мощных наносекундных импульсов. – М.: Советское радио, 1974. – 213 с.
2. Воеводин С.В., Горохов В.В., Карелин В.И. Малогабаритный высоковольтный наносекундный генератор Аркадьева–Маркса на воздушных разрядниках // Приборы и техника эксперимента. – 2000. – № 3. – С. 67–71.
3. Шустов М.А. Практическая схемотехника. Книга 3. Преобразователи напряжения. – М.: Издательский дом «Додэка-XXI», 2007. – 192 с.
4. Glidden S.C., Sanders H.D. Solid State Marx Generator. Applied Pulsed Power Inc., Freeville, N.Y. 13068. 2011. URL: <http://www.appliedpulsedpower.com/wp-content/uploads/2008/11/pmc2006-solid-state-marx-generator.pdf> (дата обращения: 22.08.2011).
5. Casey J.A., Ciprian R., Roth I., Kempkes M.A., et. al. Marx Bank Technology for Accelerators and Colliders // In: Proc. of EPAC08, 23–27 June, 2008. – Genoa, Italy, 2008. – P. 1449–1451.
6. Leyh G.H. Prototype Development Progress Toward A 500KV Solid State Marx Modulator // In: Proc. of EPAC 2004, 5–9 July, 2004. – Lucerne, Switzerland, 2004. – P. 1792–1794.
7. Apparatus for producing voltage and current pulsed: 7855904 B2 USA. Publ. Dec. 21, 2006.
8. Dale G.E., Kirbie H.C., Haynes W.B., Heath C.E., Lopez T.A., et. al. Design and Application of A Diode-Directed Solid-State Marx Modulator // In: Proc. 2005 IEEE Pulsed Power Conference. – 13–17 June, 2005. – Monterey, CA, 2005. – P. 1211–1214.
9. Мутницкий Н.Г., Татур В.В. Генератор Аркадьева–Маркса с удвоением выходного напряжения // Приборы и техника эксперимента. – 2010. – № 5. – С. 80–83.
10. Татур В.В. Стабилизатор напряжения для питания лазеров на парах металлов // Известия Томского политехнического университета. – 2010. – Т. 316. – № 4. – С. 114–118.
11. Fitch R.A., Howell V.T.S. Novel principle of transient high voltage generation // Proc. IEEE. Electronics Power Science and General. – 1964. – V. 3. – № 4. – P. 849.
12. Мутницкий Н.Г., Татур В.В. Генератор с инверсией напряжения и удвоением амплитуды выходных импульсов // Приборы и техника эксперимента. – 2011. – № 6. – С. 34–36.

Поступила 03.02.2012 г.