

МОЩНЫЕ ВЫСОКОВОЛЬТНЫЕ ГЕНЕРАТОРЫ С ПОЛУПРОВОДНИКОВЫМИ КОММУТАТОРАМИ

Бойко Н.И., докт.техн.наук

Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт»,
ул. Фрунзе, 21, Харьков, 61002, Украина.

E-mail: qnaboy@mail.ru , eft@kpi.kharkov.ua

Рассмотрены схемные решения мощных высоковольтных генераторов с полупроводниковыми коммутаторами в виде IGBT-транзисторов и SOS-диодов. Для увеличения КПД и упрощения конструкции предложено использовать в разрядном контуре генератора с SOS-диодами как высоковольтную, так и низковольтную цепи импульсного трансформатора. Предложена схема такого генератора высоковольтных импульсов с наносекундным фронтом. Отличием предложенного генератора с наносекундным фронтом, высокой частотой следования импульсов, с использованием в разрядном контуре высоковольтных и низковольтных цепей является наличие в его составе линейного импульсного трансформатора. Библ. 6, рис. 4.

Ключевые слова: генератор, коммутатор, транзистор, SOS-диод, высоковольтный импульсный трансформатор, частота следования импульсов, емкостный накопитель, индуктивность, сопротивление нагрузки.

Генераторы с полупроводниковыми коммутаторами обеспечивают частоту следования импульсов в нагрузку 50000 импульсов в секунду [1, 2]. Современные транзисторные сборки с рабочими напряжениями до 10 кВ в качестве силовых электронных коммутаторов энергии в низковольтных цепях высоковольтных генераторов позволяют получать микросекундные импульсы на нагрузке амплитудой 25÷500 кВ.

В [1-5] представлены генераторы на основе импульсных трансформаторов (ИТ) и IGBT-коммутаторов, в которых ИТ и обратные диоды в IGBT используются для рекуперации энергии, не выделившейся в нагрузку. В работе представлены режимы, в которых в разрядном контуре генераторов задействованы как высоковольтная, так и низковольтная цепи ИТ. На рис. 1 показана схема генератора, в которой IGBT-ключ может использоваться и как замыкающий, и как размыкающий коммутатор. На всех рисунках в работе $L_{нв}$, $L_{вв}$ – индуктивность рассеивания и подводящих проводников в низковольтной и высоковольтной обмотке ИТ соответственно. Схема (рис. 1) опробована в ряде генераторов [1, 2]. Когда IGBT-ключ – размыкающий коммутатор, а индуктивность намагничивания ИТ – промежуточный накопитель энергии, в разрядном контуре высоковольтной нагрузки участвуют и высоковольтная, и низковольтная цепи ИТ. Схема на рис. 1 содержит в высоковольтной цепи ИТ только нагрузку и имеет высокий КПД (примерно 90 %). Но такая схема не обеспечивает наносекундную длительность фронта импульсов на нагрузке из-за микросекундной переходной характеристики ИТ. Для обострения фронта импульсов могут быть использованы SOS-диоды в высоковольтной цепи ИТ.

Схемы с SOS-диодами разработаны российскими учеными [5, 6]. Но в этих генераторах в цепях накачки SOS-диодов используются дроссели с насыщением (магнитные ключи), которые уменьшают КПД генераторов. На рис. 2 показана принципиальная электрическая схема генератора с IGBT-коммутатором в низковольтной цепи ИТ и SOS-коммутатором в высоковольтной цепи ИТ без дросселей с насыщением.

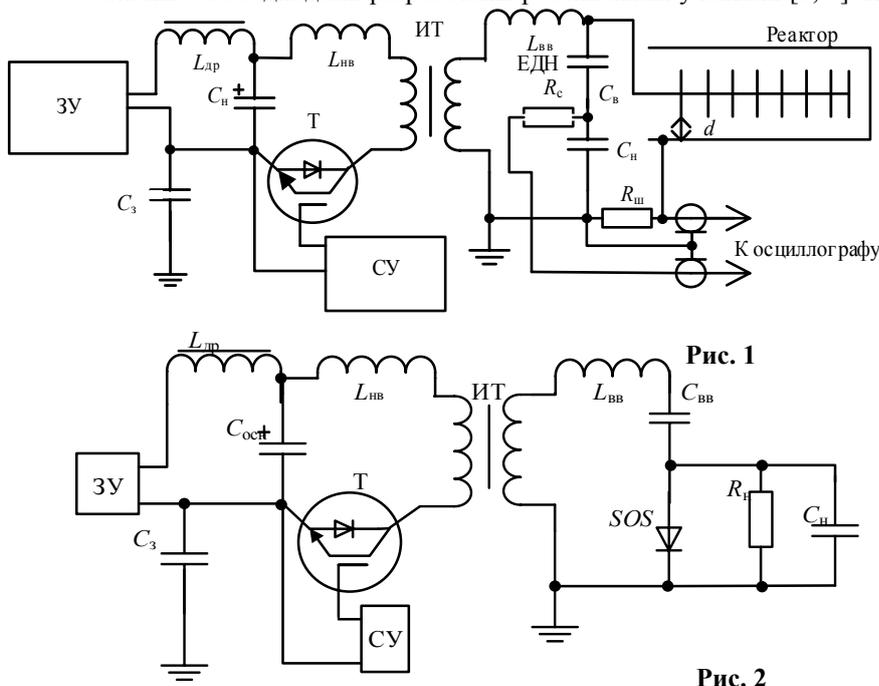


Рис. 2

В схеме (рис. 2) разрядный контур через нагрузку содержит как высоковольтные, так и низковольтные элементы: $R'_н - C'_{вв} - L'_{вв} - L_{нв} - C_{осч} - T - R'_н$, где штрихи означают приведение к низковольтной первичной обмотке ИТ. Генератор (рис. 2) в случае использования T (IGBT) в качестве замыкающего коммутатора работает следующим образом. Предварительно заряжается низковольтная емкость $C_{осч}$

основного накопителя энергии от зарядного устройства (ЗУ) до напряжения $U_{нв}$. После подачи управляющего сигнала от системы управления (СУ) через драйвер(ы) на затворы IGBT-коммутатора транзисторы открываются. В результате этого через ИТ заряжается $C_{вв}$ до напряжения $U_{вв} \leq 2\kappa_T U_{нв}$, где κ_T – коэффициент трансформации ИТ. В приведенном неравенстве удвоение напряжения на $C_{вв}$ происходит из-за $C'_{вв} \ll C_{осч}$. Необходимая энергия передается в высоковольтную цепь ИТ. При заряде $C_{вв}$ происходит накачка SOS-диодов в прямом направлении. По окончании заряда $C_{вв}$ эта емкость разряжается по контуру $SOS - C'_{вв} - L'_{вв} - L_{нв} - C_{осч} - T - SOS$, осуществляя обратную накачку SOS-диодов. В результате обратной накачки происходит наносекундный обрыв тока через SOS, и ток переключается в нагрузку с активным сопротивлением R_n и емкостью $C_n < C_{вв}$. При этом ток протекает по разрядному контуру $R'_n - C'_{вв} - L'_{вв} - L_{нв} - C_{осч} - T - R'_n$ в случае, когда R_n существенно меньше емкостного сопротивления $X_{сн}$ нагрузки. Иначе ток будет протекать как через R'_n , так и через C'_n . После переключения тока в нагрузку возможны различные варианты использования энергии, запасенной в $C_{вв}$. Например, в случае инактивирующей обработки текучих водосодержащих пищевых продуктов или воды, когда $R_n = (10 \div 100)$ Ом, $R_n < X_{сн}$ и требуется в каждом импульсе всю энергию, запасенную в $C_{вв}$, рационально выделить в R_n , необходимо, чтобы выполнялось неравенство $R'_n \gg 2[(L'_{вв} + L_{нв})/C'_{вв}]^{1/2}$. В случае, когда нагрузкой генератора является реактор, в котором в результате обрыва тока через SOS возникает импульсный коронный разряд с наносекундным фронтом, лишь малая часть энергии, запасенной в $C_{вв}$, может выделиться в реакторе. Оставшуюся энергию следует вернуть в первичный накопитель $C_{осч}$. Активное сопротивление выделения коронного разряда – большое ($R_n > 10000$ Ом). Поэтому для ускорения возвращения энергии из $C_{вв}$ в $C_{осч}$ параллельно реактору следует подключить индуктивность L_p (на рис. 2 L_p не показана), приведенная величина L'_p которой, лежит в интервале $(L'_{вв} + L_{нв}) < L'_p < L_{\mu}$.

При низкоомной нагрузке $R_n < 10$ Ом и необходимости выделить в ней всю энергию из $C_{вв}$ в каждом импульсе индуктивности $L_{св}$, $L_{сн}$ рассеивания обмоток ИТ требуется минимизировать. Это возможно выполнить,

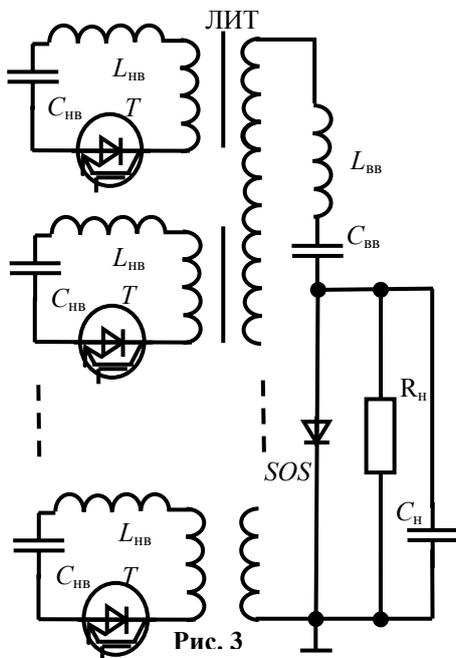


Рис. 3

применив в качестве ИТ линейный импульсный трансформатор (ЛИТ) [6]. Схема мощного генератора с ЛИТ и полупроводниковыми коммутаторами приведена на рис. 3, а схема замещения с приведением к первичной обмотке ЛИТ – на рис. 4. Ферромагнитный магнитопровод ЛИТ разделен на секции. На каждую секцию намотана одновитковая первичная обмотка, в цепи которой находятся последовательно соединенные емкостный накопитель $C_{нв}$ и коммутатор T (на рис. 3 IGBT-коммутатор). Суммарная первичная обмотка состоит из ряда одновитковых первичных обмоток, намотанных каждая на свою секцию. Вторичная обмотка выполнена также одновитковой, но охватывает все секции магнитопровода. Устройство ЛИТ обеспечивает минимальные индуктивность

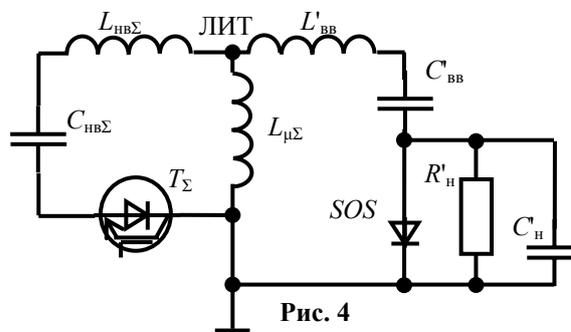


Рис. 4

рассеивания L_s и намагничивания L_{μ} (при этом $L_s \ll L_{\mu}$ как и в традиционных ИТ). По-этому длительность переходной характеристики ЛИТ короче, чем у традиционных ИТ. Коэффициент трансформации повы-

шающего ЛИТ равен $\kappa_r = n$, где n – количество секций (или первичных обмоток, образующих суммарную первичную обмотку). На рис. 4 $C_{нв\Sigma} = nC_{нв}$, $L_{нв\Sigma} = L_{нв}/n$, $L_{\mu\Sigma} = L_{\mu}/n$, L_{μ} – индуктивность намагничивания одной секции ЛИТ, T_{Σ} – суммарный IGBT-коммутатор, состоящий из n секционных IGBT-коммутаторов T , соединенных параллельно.

Низкие значения L_s и L_{μ} приводят к увеличению тока в генераторе. Это повышает требования к коммутаторам по пропускаемым токам. Современный IGBT модуль способен пропускать ток 1200 А, может выдерживать напряжение 3300 В и имеет время включения существенно меньше 1 мкс, а время выключения примерно 1 мкс (например, IGBT модуль MIO 1200-33E10). Учитывая то, что суммарная первичная обмотка состоит из n составляющих ее первичных обмоток, в каждой из которых в качестве IGBT-коммутатора включен один модуль MIO 1200-33E10 с соответствующим драйвером, при $n=25$ коммутаторы суммарной первичной обмотки способны пропустить ток $I_{доп} = 30$ кА. А расчетный ток I_p в разрядном контуре через суммарную первичную обмотку при $R_n = 8$ Ом примерно равен $I_p \approx U'_{вв}/R'_n$. При $U'_{вв} = 300$ В, $R'_n = R_n/n^2 = 0,0128$ Ом, $I_p \approx 23,4$ кА, $I_{доп} > I_p$. Значит IGBT-коммутаторы могут работать вместе с SOS-коммутаторами в разрядных контурах мощных высоковольтных генераторов. Преимуществами полупроводниковых систем коммутации с IGBT в мощных высоковольтных генераторах перед системами коммутации с искровыми разрядниками являются высокая допустимая частота следования импульсов (до сотен тысяч импульсов в секунду), высокая стабильность импульсов на нагрузке.

Кроме того, такая система коммутации обеспечивает возможность управления моментами включения и выключения IGBT коммутаторов и полную синхронность их срабатывания при параллельной работе. Допустимую частоту следования в нагрузку мощных высоковольтных импульсов с наносекундным фронтом в настоящее время ограничивают, вероятно, SOS-коммутаторы на уровне нескольких тысяч импульсов в секунду.

1. *Бойко Н.И., Евдошенко Л.С., Зароченцев А.И., Иванов В.М., Коняга С.Ф.* Высоковольтный комплекс с двумя высокочастотными генераторами импульсов, регулируемыми режимами коронного и барьерного разрядов при обработке газообразных углеводородов // *Технічна електродинаміка*. – 2012. – № 2. – С. 105–106.
2. *Бойко Н.И., Борцов А.В., Евдошенко Л.С., Иванов В.М.* Генераторы высоковольтных импульсов с частотой следования до 50000 импульсов в секунду // *Приборы и техника эксперимента*. – 2011. – № 4. – С. 92–101.
3. *Бойко Н.И., Борцов А.В., Евдошенко Л.С., Иванов В.М., Иванькина А.И., Тур А.Н.* Импульсный коронный разряд с расширенной зоной ионизации: физические основы получения и перспективные области применения // *Электротехника і електромеханіка*. – 2004. – №3. – С. 98–104.
4. *Бойко Н.И., Борцов А.В., Евдошенко Л.С., Зароченцев А.И., Иванов В.М.* Использование импульсного коронного разряда с расширенной зоной ионизации для конверсии токсичных газообразных отходов // *Электротехніка і електромеханіка*. – 2007. – № 4. – С. 64–65.
5. *Васильев П.В., Любутин С.К., Педос М.С., Пономарев А.В., Рукин С.Н., Сабитов А.К., Слоиковский Б.Г., Тимошенко С.П., Цыранов С.Н., Чолах С.О.* SOS-генератор для технологических применений // *Приборы и техника эксперимента*. – 2011. – № 1. – С. 61–67.
6. *Месяц Г.А.* Импульсная энергетика и электроника. – М.: Наука, 2004. – 704 с.

УДК 621.37

ПОТУЖНІ ВИСОКОВОЛЬТНІ ГЕНЕРАТОРИ З НАПІВПРОВІДНИКОВИМИ КОМУТАТОРАМИ

Бойко М.І. докт.техн.наук

Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»,

вул. Фрунзе, 21, Харків, 61002, Україна.

E-mail: qnaboy@mail.ru , eft@kpi.kharkov.ua

Розглянуто схемні рішення потужних високовольтних генераторів з напівпровідниковими комутаторами у вигляді IGBT-транзисторів і SOS-діодів. Для підвищення ККД і спрощення конструкції запропоновано використати у розрядному контурі генератора із SOS-діодами як високовольтне, так і низьковольтне кола імпульсного трансформатора. Запропоновано схему такого генератора високовольтних імпульсів з наносекундним фронтом. Відмінністю запропонованого генератора з наносекундним фронтом, високою частотою проходження імпульсів, з використанням у розрядному контурі високовольтних і низьковольтних кіл є наявність у його складі лінійного імпульсного трансформатора. Бібл. 6, рис. 4.

Ключові слова: генератор, комутатор, транзистор, SOS-діод, високовольтний імпульсний трансформатор, частота проходження імпульсів, ємнісний накопичувач, індуктивність, опір навантаження.

POWERFUL HIGH-VOLTAGE GENERATORS WITH THE SEMICONDUCTOR SWITCHES

Boyko M.I.

National technical university "Kharkov polytechnic institute",

Frunze str. 21, Kharkiv, 61002, Ukraine.

E-mail: qnaboy@mail.ru , eft@kpi.kharkov.ua

There were considered schemes of powerful high-voltage generators with semiconductor switches in the form of IGBT-transistors and SOS-diodes. It is proposed to use in the discharge circuit of the generator with SOS-diodes as a high-voltage well as low-voltage circuit of pulsed transformer to increase the efficiency and simplify the design. A scheme of the high-voltage pulse generator with a nanosecond front was proposed. The presence of linear pulse transformer in structure of the proposed generator with nanosecond front, high pulse repetition rate, an use in a discharge circuit high and low voltage circuits are its difference. References 6, figures 4.

Key words: generator, switch, transistor, SOS-diode, high-voltage pulse transformer, pulse repetition frequency, capacitive storage, inductance, load resistance.

1. *Boyko N.I., Evdoshenko L.S., Zarochentsev A.I., Ivanov V.M., Koniaga S.F.* The high-voltage complex with two high frequency generators that regulate modes of corona and barrier discharges when processing gaseous hydrocarbons // *Tekhnichna elektrodynamika*. – 2012. – № 2. – Pp. 105–106. (Rus)
2. *Boyko N.I., Bortsov A.V., Evdoshenko L.S., Ivanov V.M.* Generators of high-voltage pulses with high pulse repetition frequency of 50,000 pulses per second // *Pribory i Tekhnika eksperimentov*. – 2011. – № 4. – Pp. 92–101. (Rus)
3. *Boyko N.I., Bortsov A.V., Evdoshenko L.S., Ivanov V.M., Ivankina A.I., Tur A.N.* Pulsed corona discharge ionization with enlarged zone of ionization: physical fundamentals of obtaining and the perspective fields of application // *Elektrotekhnika i elektromekhanika*. – 2004. – №3. – Pp. 98 – 104. (Rus)
4. *Boyko N.I., Bortsov A.V., Evdoshenko L.S., Zarochentsev O.I., Ivanov V.M.* Using pulsed corona discharge with enlarged zone of ionization for the conversion of toxic gaseous waste // *Elektrotekhnika i elektromekhanika*. – 2007. – № 4. – Pp. 64–65. (Rus)
5. *Vasilyev P., Liubutin S., Pedos M., Ponomarev A., Rukin S., Sabitov A., Sloikovskii B., Timoshenkov S., Tsyranov S., Cholakh S.* A SOS-Generator for technological applications // *Pribory i tekhnika eksperimentov*. – 2011. – № 1. – Pp. 61–67. (Rus)
6. *Mesyats G.A.* Pulsed Power and Electronics. – Moskva: Nauka, 2004. – 704 p. (Rus)

Надійшла 04.02.2014