ЭЛЕКТРОНИКА И РАДИОТЕХНИКА

УДК 621.373.5+536.46

ДИОДНО-ТРАНЗИСТОРНЫЙ ГЕНЕРАТОР НАНОСЕКУНДНЫХ ИМПУЛЬСОВ ВЫСОКОГО НАПРЯЖЕНИЯ

© 2020 г. С. В. Коротков^{а,*}, Ю. В. Аристов^а, А. Л. Жмодиков^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 08.07.2019 г. После доработки 22.07.2019 г. Принята к публикации 31.08.2019 г.

Рассмотрен малогабаритный генератор мощных наносекундных импульсов высокого напряжения с источником питания 12 В. На нагрузке 75 Ом он позволяет формировать импульсы с амплитудой ~17 кВ, фронтом ~4 нс и энергией ~15 мДж. Предельная частота следования импульсов 15 кГц. Генератор содержит индуктивный накопитель энергии и емкостный накопитель с рабочим напряжением 1 кВ. Формирование импульсов высокого напряжения осуществляется высоковольтным прерывателем тока в виде блока дрейфовых диодов с резким восстановлением. Условия эффективной работы диодов обеспечиваются блоком параллельно соединенных IGBT-транзисторов с рабочим напряжением 1.2 кВ. Показана возможность использования генератора для многоискрового зажигания свечи двигателя внутреннего сгорания.

DOI: 10.31857/S0032816220010048

Для развития современных плазменных технологий, обеспечивающих получение материалов с новыми полезными свойствами, очистку продуктов питания, воды и воздуха, требуются генераторы мощных наносекундных импульсов, способные работать на частоте в единицы и десятки килогерц. В настоящее время наиболее перспективными являются полупроводниковые генераторы.

Хорошо известны полупроводниковые генераторы высоковольтных наносекундных импульсов с коммутаторами в виде блоков последовательно соединенных транзисторов. Их основным недостатком является недостаточно высокая импульсная мощность при времени коммутации <10 нс, обусловленная фундаментальным ограничением коммутационных возможностей транзисторов. Определенными преимуществами обладают разработанные в ФТИ им. А.Ф. Иоффе высоковольтные коммутаторы наносекундных импульсов в виде блоков последовательно соединенных дрейфовых диодов с резким восстановлением (д.д.р.в. или DSRD – drift step recovery diodes) [1, 2].

Принцип работы д.д.р.в. заключается в следующем. Сначала через диод в прямом направлении пропускается короткий импульс тока включения, обеспечивающий накопление в его структуре заряда неосновных носителей тока. На стадии высокой проводимости к д.д.р.в. прикладывается импульс напряжения противоположной поляр-

ности, и через него в обратном направлении протекает быстро нарастающий ток выключения, обеспечивающий вынос накопленных носителей тока. В процессе выключения протекающий через д.д.р.в. ток I_{DSRD} коммутируется в параллельную цепь нагрузки. При субмикросекундной длительности импульсов тока включения и выключения и оптимальной плотности тока I_{DSRD} скорость обрыва тока в диодах очень высока и длительность фронта нарастания тока в цепи нагрузки составляет несколько наносекунд.

Современная технология изготовления д.д.р.в. позволяет обеспечить хорошую воспроизводимость электрофизических параметров. В результате при их последовательном соединении заряд, накапливаемый в каждом диоде при пропускании общего тока включения, практически одинаков, что обеспечивает высокую синхронность их выключения при создании одинакового для всех приборов тока выключения.

На рис. 1 приведена схема разработанного д.д.р.в.-генератора мощных наносекундных импульсов высокого напряжения. Он построен на основе ранее описанного диодно-транзисторного генератора [3]. Важным достоинством представленного устройства является уменьшение габаритов в результате использования только одного транзисторного ключа



Рис. 1. Электрическая схема д.д.р.в.-генератора. *А* – аккумулятор 12 В; *T* – IRGPS60B120KDP (4 параллельно); *D* – HER608 (3 параллельно).

Генератор работает следующим образом. В исходном состоянии конденсатор C_1 заряжен от аккумулятора А до напряжения 12 В. При включении блока транзисторов Т через индуктивный накопитель энергии L₁ протекает практически линейно нарастающий ток разряда C₁. При выключении T он коммутируется в цепь $C_2 - L_2$ – DSRD. В результате происходит зарядка емкостного накопителя энергии C_2 до напряжения, существенно превышающего напряжение зарядки C₁. В процессе зарядки C_2 через блок д.д.р.в. в прямом направлении протекает ток, обеспечивающий накопление заряда в их структурах. В момент окончания тока зарядки повторно включается блок T, и C_2 разряжается по цепи T-DSRD- L_2 . Ток разряда C_2 протекает через блок д.д.р.в. в обратном направлении и обеспечивает вынос накопленного заряда и выключение диодов. В процессе разряда С₂ до нуля через блок д.д.р.в. в обратном направлении пропускается практически такой же заряд, как ранее пропускался в прямом направлении при зарядке C_2 до максимального напряжения. В результате выключение блока д.д.р.в. происходит в момент полного разряда С2 при максимальном токе через индуктивность L₂. В процессе выключения блока д.д.р.в. протекающий через L_2 ток коммутируется в нагрузку Z и является выходным током генератора. При этом на нагрузке формируется быстро нарастающий импульс выходного напряжения U с амплитудой, определяемой произведением выходного тока на сопротивление нагрузки. После окончания процесса коммутации осуществляется выключение блока Т и схема приходит в исходное состояние.

В опытном образце генератора блок T был выполнен в виде четырех параллельно соединенных IGBT-транзисторов IRGPS60B120KDP с рабочим напряжением 1200 В. Малые потери энергии в транзисторах достигались благодаря форсированному управлению [4]. Блок д.д.р.в. состоял из 16 напаянных друг на друга диодных структур с диаметром 20 мм и рабочим напряжением 1.2 кВ. В качестве емкостного накопителя энергии C_2 ис-



Рис. 2. Осциллограмма тока I_{DSRD} через блок д.д.р.в. и выходного напряжения U на нагрузке Z = 75 Ом. Масштаб по вертикали: тока – 125 А/деление, напряжения – 5 кВ/деление; по горизонтали – 200 нс/деление (**a**) и 10 нс/деление (**б**).

пользовался пленочный конденсатор с емкостью 0.1 мк Φ и рабочим напряжением 1 кВ. Конденсатор C_1 был выполнен в виде сборки параллельно соединенных электролитических конденсаторов с рабочим напряжением 25 В.

На рис. 2а и 2б в разных масштабах по времени приведены осциллограммы тока через блок д.д.р.в. $I_{\rm DSRD}$ и выходного напряжения U, полученные при использовании в качестве нагрузки Z резистора с сопротивлением 75 Ом. Из представленных осциллограмм следует, что выходная энергия генератора составляет ~15 мДж, выходной ток ~250 A, а фронт и амплитуда импульсов выходного напряжения ~4 нс и ~17 кВ.

На рис. 3 приведена осциллограмма выходного напряжения $U(\sim 32 \text{ kB})$ на конце разомкнутого коаксиального кабеля с волновым сопротивлением 75 Ом, подключенного к блоку д.д.р.в. для обеспечения возможности работы на удаленную нагрузку.

Возможность формирования высоковольтных импульсов наносекундной длительности при очень малом напряжении питания и без повышающего трансформатора создает определенные перспективы использования рассмотренного генератора для создания искры в свече зажигания двигателя внутреннего сгорания.

В современных системах зажигания пробой межэлектродного промежутка свечи осуществляется высоковольтным импульсом с микросекундным фронтом. Длительность процесса горения свечи составляет единицы миллисекунд, при этом в межэлектродном промежутке образуется высокотемпературная равновесная плазма, и процесс воспламенения топлива развивается по тепловому механизму. При тепловом зажигании плазмохимические реакции горения сосредоточены в небольшой области канала разряда. При этом для воспламенения всей топливной смеси требуется большая концентрация топлива и большая энергия зажигания.

Недостатки тепловых систем зажигания определяют необходимость разработки альтернативных решений. Как показывают исследования [5–8], большие перспективы имеют системы зажигания, в которых для воспламенения топлива используется неравновесная плазма, созданная высоковольтными разрядами наносекундной длительности. Большая скорость нарастания напряжения определяет высокую напряженность поля в межэлектродном промежутке свечи в момент пробоя. В результате "плазменные" электроны разгоняются до больших скоростей и инициируют интенсивное образование активных частиц (атомов кислорода и радикалов ОН и СН), которые участвуют в экзотермических реакциях окисления и улучшают условия воспламенения и стабилизации пламени. По мнению авторов, при наносекундном зажигании свечи может быть уменьшен расход топлива и достигнуто его более полное сгорание, обеспечивающее снижение токсичности отработанных газов.

С целью определения перспектив использования разработанного наносекундного генератора для зажигания свечи двигателя внутреннего сгорания было проведено его сравнение с традиционным генератором микросекундных импульсов высокого напряжения, выполненным по схеме обратноходового инвертора.

Микросекундный генератор содержал аккумулятор 12 В, IGBT-транзистор и повышающий трансформатор в виде катушки зажигания фирмы Magneti Marelli. При включении транзистора аккумулятор обеспечивал практически линейное нарастание входного тока в первичной обмотке



Рис. 3. Осциллограмма выходного напряжения на разомкнутом конце кабеля. Масштаб по вертикали 5 кВ/деление, по горизонтали – 4 нс/деление.

катушки зажигания. При выключении транзистора входной ток обрывался и на вторичной обмотке катушки формировался импульс высокого напряжения, который прикладывался к свече. После пробоя свечи накопленная в магнитной системе катушки энергия выделялась в канале разряда. Ее величина определялась входным током катушки в момент выключения транзистора. Эксперименты проводились при максимальном для используемой катушки зажигания входном токе ~9 А, который не приводил к насыщению материала сердечника.

Сравнительные исследования проводились со свечой DENSO Q20P-U, не имеющей внутреннего резистора, что было принципиально важно для работы с наносекундным генератором. В этой связи микросекундный генератор подключался к свече через резистор 5 кОм, необходимый для штатной работы катушки зажигания. Генератор наносекундных импульсов соединялся со свечой коаксиальным кабелем, имеющим длину 8 м и волновое сопротивление 75 Ом.

Эксперименты проводились при комнатной температуре в атмосферном воздухе. В этих условиях микросекундный генератор обеспечивал нарастание напряжения на свече со скоростью ~2.3 В/нс и инициировал ее пробой при напряжении ~7 кВ через ~3 мкс после приложения высокого напряжения. После пробоя через межэлектродный промежуток свечи протекал монотонно спадающий ток с амплитудой ~0.1 А и длительностью ~2000 мкс. При этом в свечу вкладывалась энергия ~25 мДж.

При использовании наносекундного генератора напряжение на свече нарастало с существенно большей скоростью (~5 кВ/нс), что позволило



Рис. 4. Напряжение *U* на свече и ток *I* через нее при использовании наносекундного генератора. Масштаб по вертикали: напряжения -2.5 кВ/деление, тока -40 А/деление; по горизонтали -4 нс/деление(**a**) и 100 нс/деление (**б**).

за время развития пробоя в межэлектродном промежутке свечи достигнуть напряжения ~16 кВ (см. осциллограммы на рис. 4а). При этом амплитуда тока разряда через свечу составляла ~250 А. После пробоя к свече в течение ~1 мкс прикладывалась серия затухающих импульсов напряжения и тока (см. осциллограммы на рис. 4б). Она формировалась в результате многократных отражений созданной в кабеле электромагнитной волны от свечи, имеюшей малое сопротивление после пробоя, и от блока д.д.р.в., обладающего высокой проводимостью для этой полярности тока. Так как потери энергии в кабеле невелики, то можно предположить, что при этом в свечу вкладывается практически вся выходная энергия наносекундного генератора (~15 мДж).

Так как импульсная мощность наносекундного генератора значительно выше мощности микросекундного генератора, то при наносекундном воздействии разряд развивается более интенсивно, несмотря на его существенно меньшие длительность и рассеиваемую энергию.

На рис. 5а и 5б показан разряд в свече при использовании соответственно микро- и наносекундного генераторов.

В рассмотренном наносекундном генераторе предельная частота следования импульсов высокого напряжения составляет >10 кГц и определяется, в основном, временем нарастания тока через индуктивность L_1 (~50 мкс). При этом становится возможным обеспечить высокоэффективное [9] многоискровое зажигание свечи путем создания нескольких серий наносекундных разрядов.

На рис. 5в показан разряд в свече, полученный при использовании пяти серий наносекундных разрядов, формируемых с интервалом 200 мкс.

На рис. 6 приведены усредненные графики зависимостей напряжения пробоя свечи в воздушной среде от давления воздуха, полученные при



Рис. 5. Разряд в свече при использовании микро- (**a**) и наносекундного (**б**) импульса высокого напряжения; **в** – при использовании пяти серий наносекундных разрядов, формируемых с интервалом 200 мкс.

комнатной температуре в барокамере Э203-П, имитирующей условия, характерные для работы свечи в двигателе внутреннего сгорания. Кривая *1* получена при использовании микросекундного генератора, кривые *2*, *3* – при работе с наносекундным генератором в многоискровом режиме. Кривая *2* соответствует первому импульсу в первой серии, кривая *3* – первому импульсу во второй серии, следующей через 200 мкс после первой.

Как видно из приведенных графиков, во всем исследуемом диапазоне изменения давления пробой свечи при наносекундном воздействии происходит при существенно большем напряжении, чем при микросекундном. Полученный результат предполагает увеличение интенсивности плазмохимических реакций горения топливной смеси, определяющее возможность зажигания свечи при меньшем расходе топлива. Подтверждение этой возможности было получено при исследовании процесса воспламенения смеси воздуха и паров бензина АИ-95.

Смесь создавалась при комнатной температуре в заполненной воздухом герметичной емкости объемом 1 л. Через ниппель в емкость вводился небольшой объем бензина: 10, 20,..., 60 мл. После полного испарения бензина образовавшаяся смесь забиралась шприцем с объемом 150 мл и через ниппель вводилась в герметичную взрывную камеру объемом ~50 мл. Камера была выполнена в виде стальной трубы Ø 35 мм, к торцам которой были приварены металлические пластины. В одной пластине закреплялась свеча, в другую вставлялась фторопластовая пробка, которая после взрыва смеси вылетала при давлении внутри камеры \geq 3 атм.

В процессе экспериментов было установлено, что при использовании нано- и микросекундного генераторов устойчивое возгорание воздушнобензиновой смеси достигается соответственно при 30 и 40 мл бензина, используемого при ее создании. Полученный результат дает определенные преимущества процессу зажигания свечи наносекундным импульсом.

Таким образом, результаты предварительных исследований разработанного малогабаритного генератора показывают возможность высокочастотной генерации мощных наносекундных импульсов высокого напряжения и позволяют считать его весьма перспективным для исследования процессов зажигания свечи двигателя внутреннего сгорания.



Рис. 6. Графики зависимостей напряжения пробоя свечи в воздушной среде от давления воздуха при микро- (1) и наносекундной (2) длительности процесса зажигания; 3 – при многоискровом наносекундном зажигании.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена при поддержке программы Президиума РАН № 7 "Новые разработки в перспективных направлениях энергетики, механики и робототехники".

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Grekhov I.V., Efanov V.M., Kardo-Sysoev A.F., Shenderey S.V. // Solid-State Electron. 1985. V. 28. P. 597.
- Grekhov I.V., Mesyats G.A. // Phys.-Usp. 2005. V. 49. P. 703.
- Коротков С.В., Воронков В.Б., Аристов Ю.В. // ПТЭ. 2015. № 4. С. 48. https://doi.org/10.7868/S0032816215040072
- 4. Коротков С.В., Аристов Ю.В., Жмодиков А.Л., Козлов А.К., Коротков Д.А. // ПТЭ. 2018. № 1. С. 42. https://doi.org/10.7868/S0032816218010202
- Puchkarev V., Gundersen M. // Appl. Phys. Lett. 1997. V. 71(23). P. 3364.
- 6. *Messina D., Attal-Tretout B., Grisch F. //* Proc. Comb. Inst. 2007. V. 31. P. 825.
- Tropina A.A., Lenarduzzi L., Marasov S.V., Kuzmenko A.P. // IEEE Trans. Plasma Sci. 2009. V. 3. № 12. P. 2286.
- Ghadikolaei M.A. // International J. Engineering and Innovative Technology (IJEIT). 2014. V. 3. Issue 7.
- Абрамчук Ф.И., Кабанов А.Н., Швыдский Д.В. // Автомобильный транспорт. 2014. Вып. 34. С. 28.