

<http://dx.doi.org/10.15589/jnn20140509>

УДК 621.3.011.4:621.319.5

М 74

SIMULATION OF IMPACT OF GENERATOR INHERENT PARAMETERS OF HIGH-VOLTAGE PULSES ON DISCHARGE CHARACTERISTICS FOR STREAMER DISCHARGES IGNITION

МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ СОБСТВЕННЫХ ПАРАМЕТРОВ ГЕНЕРАТОРА ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ ИМПУЛЬСОВ НА РАЗРЯДНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ДЛЯ ЗАЖИГАНИЯ СТРИМЕРНЫХ РАЗРЯДОВ

Leonid Z. Bohuslavskiy

dpes@iipr.com.ua

ORCID: 0000-0001-6738-1889

Yurii H. Kazarian

49yura@inbox.ru

ORCID: 0000-0002-7985-9699

Mykola S. Yaroshynskiy

kabalo@yandex.ru

ORCID: 0000-0002-5884-5917

Vitalii V. Diordiichuk

redlineone@rambler.ru

ORCID: 0000-0002-9490-1672

Л. З. Богуславский,

канд. техн. наук;

Ю. Г. Казарян,

канд. техн. наук;

Н. С. Ярошинский,

инж.;

В. В. Диордийчук,

инж.

Institute of Pulse Processes and Technologies of NAS of Ukraine, Mykolaiv

Институт импульсных процессов и технологий НАН Украины, г. Николаев

Abstract. The impact of generator inherent parameters on discharge characteristics for streamer discharges ignition, the cold plasma of which occupies the entire volume, has been studied. The characteristic feature of this generator is the formation of high-voltage pulses on the load to generate a streamer discharge which is the electrode system with a sufficiently large capacitive component due to the area of the electrodes. The operation of the generator was simulated using the LT Spice IV on the basis of an equivalent circuit was simulated. The individual elements parameters flexibly varied with the help of the model from the low-voltage part and the high-voltage side of the circuit. The possible influence rate of each parameter separately on the output characteristics of the pulse generator was determined. On the basis of the simulation results it allowed to create the pulse generator with a rise time less than 1 ms, pulse repetition rate below 10 kHz and pulse amplitude up to 80 kV. This generator can be used for gas treatment technology and materials surface processing.

Keywords: high voltage pulse; pulse front; streamer volume discharge.

Аннотация. Проведено компьютерное моделирование разрядных характеристик эквивалентной схемы генератора высоковольтных высокочастотных импульсов с коротким фронтом. Получены зависимости изменения формы и амплитуды выходного напряжения генератора, позволившие найти оптимальные значения элементов схемы для обеспечения зажигания объемного стримерного разряда с объемом холодной плазмы до 100 л.

Ключевые слова: высоковольтный импульс; фронт импульса; стримерный объемный разряд.

Анотація. Проведено комп'ютерне моделювання розрядних характеристик еквівалентної схеми генератора високовольтних високочастотних імпульсів з коротким фронтом. Отримано залежності зміни форми та амплітуди вихідної напруги генератора, які дозволили знайти оптимальні значення елементів схеми для забезпечення запалювання об'ємного стримерного розряду з об'ємом холодної плазми до 100 л.

Ключові слова: високовольтний імпульс; фронт імпульсу; стримерний об'ємний розряд.

REFERENCES

- [1] Boyko N.I., Safronov I.A. Malogabaritnyy chastotnyy generator vysokovoltnykh impulsov s subnanosekundnym frontom [High-voltage pulses portable frequency generator of with subnanosecond front]. *Tezisy dokladov VI nauchnoy shkoly «Fizika impulsnykh vozdeystviy na kondensirovannye sredy» (11.09-14.09.1993)* [Abstracts

- of reports of the VI Research School «Physics of impulse actions on condensed media», 11.09–14.09.1993]. Mykolaiv, 1993, pp. 198.
- [2] Belkin V.S., Shulzhenko G.I. Formirovateli vysokovoltnykh nanosekundnykh impulsov s nizkovoltnym pitaniem [Conditioners of high-voltage nanosecond pulses with low-voltage power]. *PTE – PTE*, 1994, no. 4.
 - [3] Boguslavskiy L.Z., Mirishnichenko L.N., Kazaryan Yu.G., Khristo A.I. Vysokovoltnyy vysokochastotnyy istochnik impulsov s korotkim frontom dlya elektrorazryadnykh tekhnologiy [The high-voltage high-power pulses source with short edge for electric-discharge technologies]. *Tekhnichna elektrodynamika. Temat. vyp. «Problemy suchasnoi elektrotekhniki» – Technical electrodyamics. Thematic issue «Problems of modern electrical engineering»*, 2010, part 3, pp. 84–87.
 - [4] Boguslavskiy L.Z., Mirishnichenko L.N., Kazaryan Yu.G., Diordiyuchuk V.V. Issledovaniya elektrofizicheskikh protsessov zazhiganiya obemnogo razryada v aerolnom potoke pri izmenenii chastoty sledovaniya impulsov [Research of electrophysical processes of volume discharge ignition in aerosol stream when the pulse repetition frequency changes]. *Materialy Mezhdunar. nauch. konf. «Fizika impulsnykh razryadov v kondensirovannykh sredakh»* [Proceedings of the International scientific conference «Physics of impulse discharges in condensed media»]. Mykolaiv, 2011, pp. 54–57.
 - [5] Mesyats G.A. *Impulsnaya energetika i elektronika* [Pulsed power engineering and electronics]. Moscow, Nauka Publ., 2004. 704 p.
 - [6] Osipov V.V. Samostoyatelnyy obemnyy razryad [Inherent volume discharge]. *UFN – UFN*, 2000, vol. 170, pp. 225–245.
 - [7] Pichugina M.T. *Vysokovoltная электротехника* [High-voltage electrical engineering]. TPU Publ., 2011. 119 p.
 - [8] Chekalov L.V. *Konstruktivnye osobennosti i promyshlennoe vnedrenie elektrofiltrov s impulsnym pitaniem: obzornaya informatsiya* [Constructive features and industrial application of electric filter with pulsed power: overview]. Moscow, TsINTIkhimneftemash Publ., 1993. 19 p.

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ

Развитие новых технологических направлений использования высоковольтных разрядных процессов требует создания специального класса оборудования, обеспечивающего формирование высоковольтных импульсов с частотой следования до 10 кГц, напряжением до 100 кВ и крутизной фронта до сотен наносекунд. Такие параметры высоковольтных импульсов обеспечивают генерирование стримерных коронных и объемных разрядов в газовых средах [6], которые используются в технологиях газоочистки, поверхностной обработке материалов, а также в нанотехнологиях, экологических проектах и т. д.

Проблемы генерации, формирования и трансформации мощных коротких импульсов регулярно обсуждаются на ежегодных международных симпозиумах в Европе, Азии и США, их актуальность подтверждается многочисленными ежегодными конференциями по импульсной высоковольтной тематике (*IEEE Pulsed Power Conference PPS-2013, IEEE International Power Modular and High Voltage Conference IPMHVC-2012*).

Современные мощные импульсные генераторы имеют различные схемные решения, что определяется, в первую очередь, видами и режимами работы применяемых накопителей энергии (НЭ) и коммутирующих приборов. Повышение ресурса импульсных генераторов связано с поиском схемных решений, использующих в качестве коммутирующих элементов полупроводниковые приборы.

АНАЛИЗ ПОСЛЕДНИХ ИССЛЕДОВАНИЙ И ПУБЛИКАЦИЙ

Вопросы создания генераторов коротких импульсов высокого напряжения изложены в работах Г.А. Месяца, Б.М. Ковальчука, В.В. Кремнева R.A. Fitch, F. Ruhl и других авторов [1, 2, 5, 7]. Современные мощные импульсные генераторы имеют различные схемные решения, что определяется в первую очередь видами и режимами работы применяемых накопителей энергии (НЭ) и коммутирующих приборов.

Анализ существующих источников коротких импульсов напряжения с высокой частотой следования показал, что различные типы генераторов имеют каждый свои ограничения к широкому внедрению. Основным ограничением наиболее развитых на сегодня систем на основе индуктивных накопителей с коммутаторами на SOS-диодах является стоимость таких коммутаторов (от 5 тыс. у. е.) и сложность схемных решений.

Системы на основе емкостных накопителей с полупроводниковыми ключами и повышающими импульсными трансформаторами требуют оптимизации схемных решений, снижения массогабаритных показателей, повышения надежности при обеспечении высоких рабочих напряженностей электрического поля. Основной проблемой является создание генераторов, обеспечивающих генерацию импульсов с наносекундным фронтом.

В Институте импульсных процессов и технологий НАН Украины разработана и испытана схема высококачественного формирователя импульсов с коротким фронтом на напряжения до 100 кВ с полупроводниковым коммутирующим элементом, обеспечивающим за счет безыскровой коммутации высокий ресурс работы генератора.

ЦЕЛЬ СТАТЬИ – исследование влияния собственных параметров генератора на разрядные характеристики для зажигания стримерных разрядов, холодная плазма которых покрывает большие рабочие объемы.

ИЗЛОЖЕНИЕ ОСНОВНОГО МАТЕРИАЛА

Для генерирования стримерных коронных и объемных разрядов в газовых средах предпочтительно применение генераторов импульсов микросекундного диапазона с коротким фронтом и килогерцового диапазона частот следования импульсов [4]. В [3]

предложено схемное решение формирователя высоковольтных импульсов, удовлетворяющего заданным требованиям, с использованием силового полупроводникового ключа, включенного в низковольтную часть импульсного высоковольтного трансформатора. Схема такого генератора приведена на рис. 1. Особенность работы схемы – формирование высоковольтных импульсов на нагрузке с достаточно большой емкостной составляющей, обусловленной площадью электродной системы для генерирования объемного разряда.

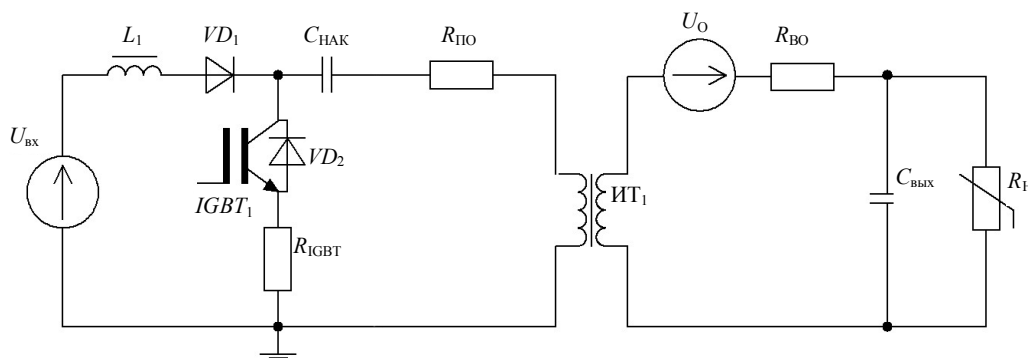


Рис. 1. Схема генератора высоковольтных импульсов

Формирование высоковольтных импульсов с коротким фронтом достигается путем коммутации заряженного импульсного конденсатора $C_{НАК}$ на первичную обмотку низкоиндуктивного импульсного высоковольтного трансформатора, вторичная обмотка которого соединена непосредственно с нагрузкой, ток заряда $C_{НАК}$ от источника питания постоянного напряжения ограничивается дросселем L_1 . Размагничивается трансформатор по цепи $C_{ТР}$ и $R_{ПО}$ – приведенные емкость и сопротивление высоковольтного трансформатора. Остальные элементы схемы: $R_{ВО}$ – суммарное сопротивление подводящих проводов электродной системы и вторичной обмотки ИТ₁; $C_{ВЫХ}$ – емкость электродной системы; $R_Н$ – нелинейное сопротивление объемного плазменного образования стримерной короны. Характеристики такой емкостно-омической нагрузки описаны в [8].

Для определения влияния собственных параметров генератора высоковольтных высокочастотных импуль-

сов, обеспечивающих условия для зажигания и поддержки стримерных разрядов, на форму разрядного напряжения, необходимо провести моделирование схемы замещения генератора с учетом собственных параметров импульсного трансформатора (рис. 2). Предварительные исследования позволили рекомендовать для анализа Т-образную схему замещения трансформатора, программа-симулятор была выбрана *LTspice IV*.

Изменяя расчетную индуктивность рассеивания первичной обмотки L_2 в пределах от 0,5 до 2,5 мкГн с шагом 0,5 мкГн, получили зависимость влияния индуктивности рассеивания первичной обмотки на разрядные характеристики (рис. 3).

Зависимости на рис. 3 показывают, что при увеличении индуктивности рассеивания первичной обмотки от 1,5 до 3,5 мкГн фронт импульса изменяется в пределах от 0,3 до 1 мкс. При индуктивности рассеивания свыше 2,5 мкГн фронт нарастания импульса превышает 0,8 мкс.

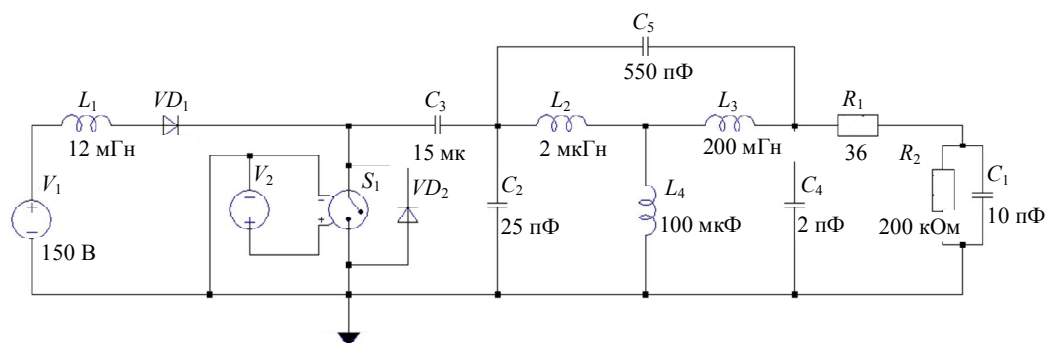


Рис. 2. Эквивалентная схема генератора высоковольтных высокочастотных импульсов в программе-симуляторе *LTspice IV*

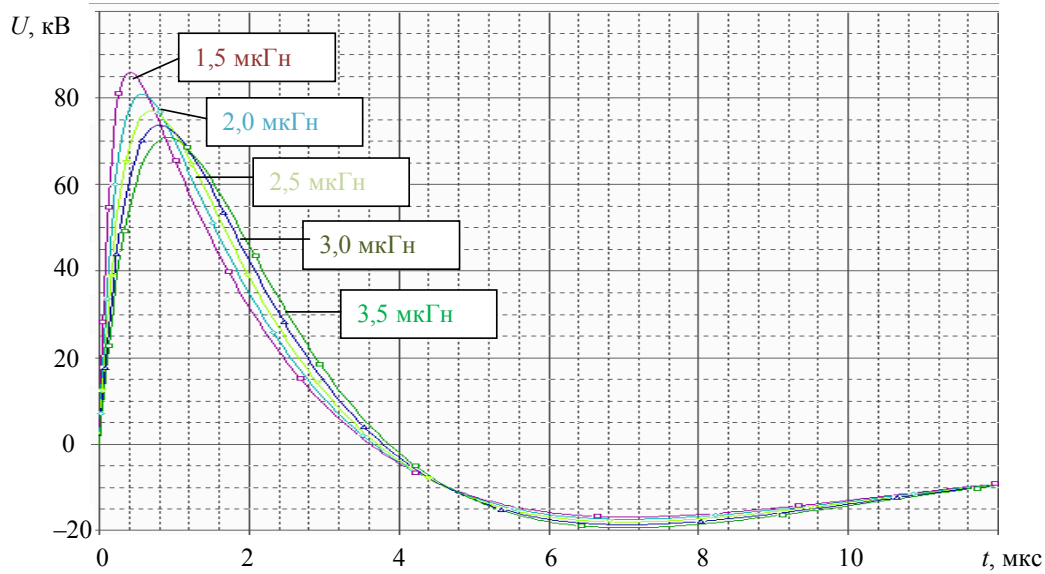


Рис. 3. Зависимость выходного напряжения от индуктивности рассеивания первичной обмотки

Для исследования влияния индуктивности рассеивания вторичной обмотки L_3 на разрядные характеристики были выбраны пределы от 1 до 5 мкГн с шагом 1 мкГн (рис. 4).

Зависимости на рис. 4 показывают, что при увеличении индуктивности рассеивания вторичной обмотки от 1 до 5 мкГн фронт импульса изменяется в пределах от 0,1 до 1,4 мкс. При индуктивности рассеивания свыше 3 мкГн фронт нарастания импульса превышает 1 мкс, что нежелательно.

Для определения необходимой индуктивности рассеивания сердечника L_4 трансформатора были проведены исследования в пределах от 50 до 250 мкГн с шагом 50 мкГн (рис. 5).

При анализе рис. 5 было выявлено, что индуктивность намагничивания не влияет на фронт импульса или на его амплитуду, но индуктивность свыше 100 мкГн приводит к появлению отрицательной полуволны импульса.

При расчете накопительного конденсатора исходили из того, что для того чтобы потери мощности не приводили к чрезмерному падению напряжения на нагрузке и, соответственно, к увеличению фронта импульса, емкость накопительного конденсатора должна соответствовать зависимости:

$$C_{\text{ист}} \geq C_{\text{нагр}} n^2,$$

где n – коэффициент трансформации.

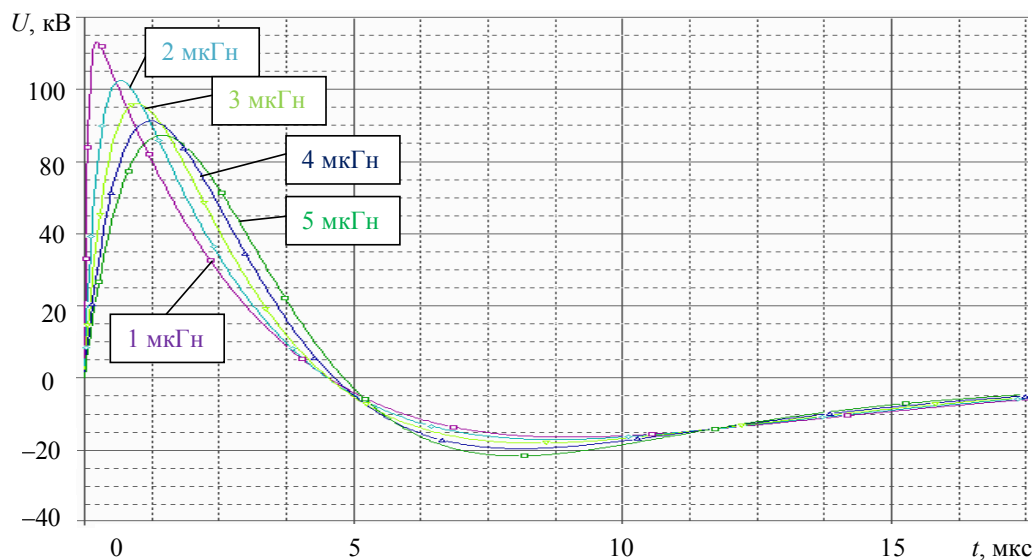


Рис. 4. Зависимость выходного напряжения от индуктивности рассеивания вторичной обмотки

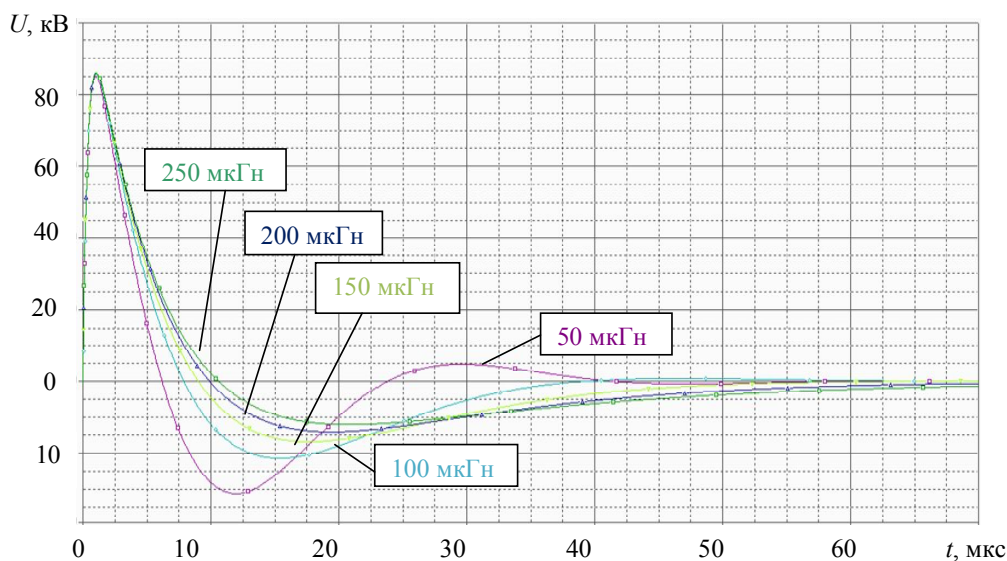


Рис. 5. Зависимость выходного напряжения от индуктивности намагничивания

Исходя из описанного выше, емкостный накопитель источника исследовали в пределах от 10 до 40 мкФ с шагом 5 мкФ. Результаты исследований приведены на рис. 6 и 7.

Зависимости на рис. 6 показывают, что увеличение емкости C_3 свыше 30 мкФ приводит к появлению высокочастотных колебаний напряжения на нагрузке, которые могут негативно сказаться на появлении стримерных разрядов.

На рис. 7 (увеличенное разрешение по времени) показано, что емкость накопителя источника свыше 20 мкФ приводит к увеличению фронта импульса больше чем на 1 мкс.

По результатам моделирования создан генератор высоковольтных высокочастотных импульсов с корот-

ким фронтом, заходящим в наносекундную область со следующими параметрами: индуктивность рассеивания первичной обмотки $L_2 = 2$ мкГн; индуктивность рассеивания вторичной обмотки $L_3 = 2$ мкГн; индуктивность намагничивания $L_4 = 100$ мкГн; емкость накопительного конденсатора $C_3 = 15$ мкФ. При таких параметрах элементов генератора удалось сформировать выходной сигнал с фронтом до 1 мкс (рис. 8) при напряжении 60 кВ и частоте следования импульсов 10 кГц.

Экспериментальный генератор высоковольтных импульсов с коротким фронтом (рис. 9,а) при работе на многоострийную электродную систему, способен производить до 100 л стримерной плазмы (рис. 9,б).

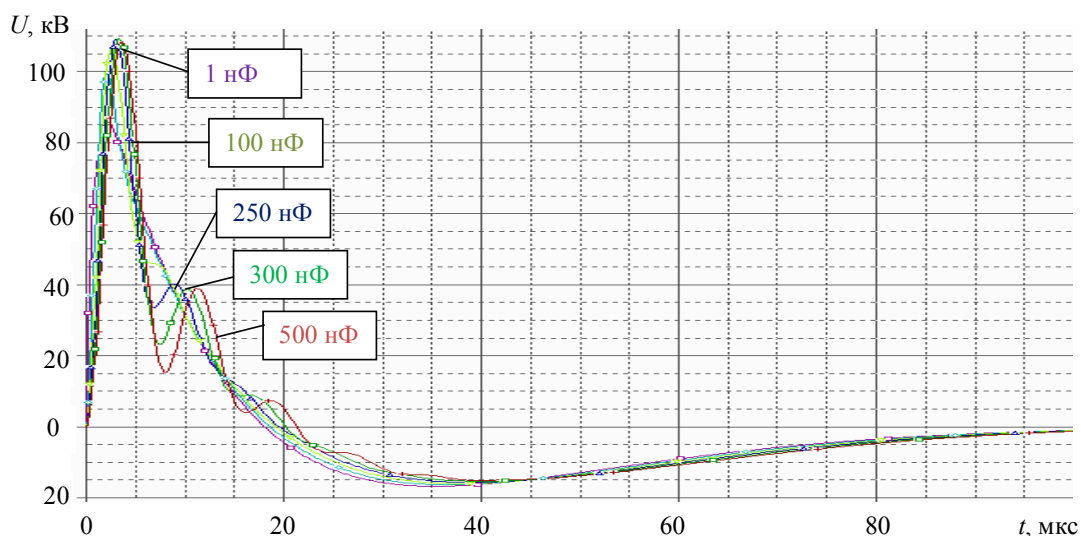


Рис. 6. Форма импульса напряжения на нагрузке при изменении емкости накопителя C_3 от 10 до 40 мкФ

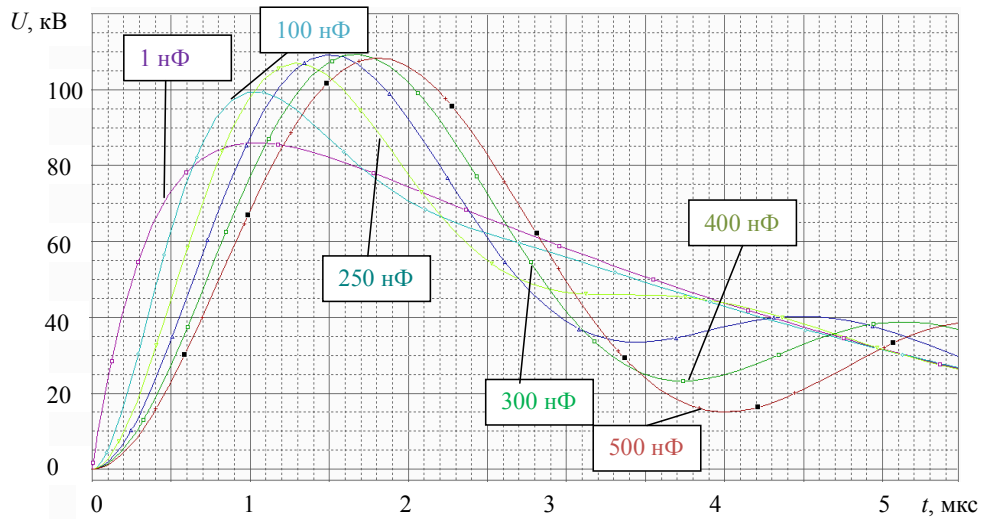


Рис. 7. Вид фронтов импульсов напряжения на нагрузке при изменении емкости накопителя от 10 до 40 мкФ

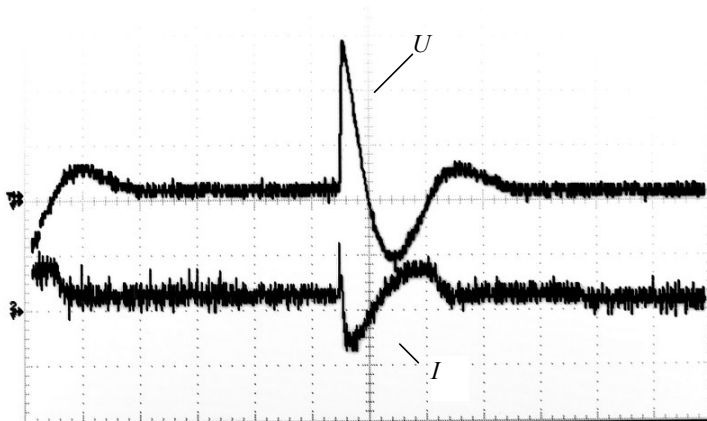
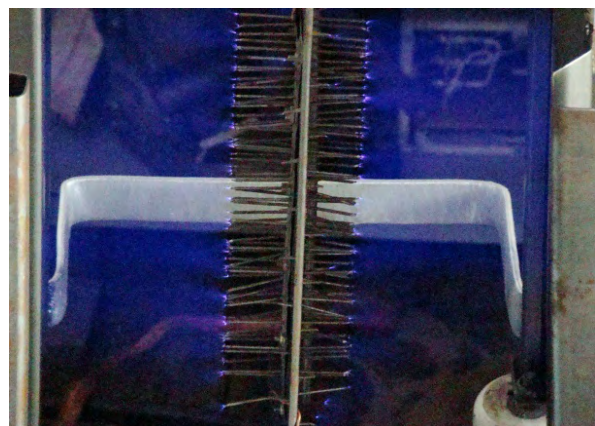


Рис. 8. Напряжение и ток на нагрузке. Развертка 2 мкс/дел.



a



б

Рис. 9. Внешний вид генератора импульсов с коротким фронтом (*a*) и объемный стримерный коронный разряд при $U = 60$ кВ, $t = 0,5$ мкс (*б*)

Применение полупроводникового ключа в силовой части схемы позволило значительно увеличить ресурс генератора по сравнению с аналогичными устройствами, построенными на вакуумных либо искровых коммутирующих элементах.

ВЫВОДЫ

По результатам проведенных исследований создан макетный образец генератора высоковольтных импульсов с коротким фронтом до 1 мкс и выходным

напряжением до 100 кВ для генерирования объемного стримерного коронного разряда в газовой среде. Использование расчетных параметров элементов схемы генератора, позволило уменьшить фронт выходного сигнала без применения электроразрядных обострителей меньше 1 мкс и получить до 100 л плазмы стримерного разряда. Данный генератор предполагается использовать в технологиях одновременной газоочистки и озонирования промышленных газов, а также поверхностной обработки материалов.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] **Бойко, Н. И.** Малогабаритный частотный генератор высоковольтных импульсов с субнаносекундным фронтом [Текст] / Н. И. Бойко, И. А. Сафронов // Тезисы докладов VI научной школы «Физика импульсных воздействий на конденсированные среды. – Николаев : Институт импульсных процессов и технологий НАН Украины, 1993. – 198 с.
- [2] **Белкин, В. С.** Формирователи высоковольтных наносекундных импульсов с низковольтным питанием [Текст] / В.С. Белкин, Г.И. Шульженко // ПТЭ. – 1994. – №.4.
- [3] Высоковольтный высокочастотный источник импульсов с коротким фронтом для электроразрядных технологий [Текст] / Л. З. Богуславский, Л. Н. Мирошниченко, Ю. Г. Казарян, А. И. Христо // Технічна електродинаміка. Тем. вип. «Проблеми сучасної електротехніки». – 2010. – Ч. 3. – С. 84–87.
- [4] Исследования электрофизических процессов зажигания объемного разряда в аэрозольном потоке при изменении частоты следования импульсов [Текст] / Л. З. Богуславский, Л. Н. Миришниченко, Ю. Г. Казарян, В. В. Диордийчук // Матер. Междунар. науч. конф. «Физика импульсных разрядов в конденсированных средах». – Николаев : КП «Миколаївська обласна друкарня», 2011. – С. 54–57.
- [5] **Месяц, Г. А.** Импульсная энергетика и электроника [Текст] / Г. А. Месяц. – М. : Наука, 2004. – 704 с.
- [6] **Осипов, В. В.** Самостоятельный объемный разряд [Текст] / В.В. Осипов // УФН. –2000. – Т. 170. – С. 225–245.
- [7] **Пичугина, М. Т.** Высоковольтная электротехника [Текст] / М. Т. Пичугина. – Томск : ТПУ, 2011. – 119 с.
- [8] **Чекалов, Л. В.** Конструктивные особенности и промышленное внедрение электрофильтров с импульсным питанием: обзорная информация [Текст] / Л. В. Чекалов // Пром. и сан. очистка газов. – М. : ЦИНТИхимнефтемаш, 1993. – 19 с.

© Авторський колектив

Надійшла до редколегії 23.06.2014

Статтю рекомендує до друку член редколегії ЗНП НУК
д-р техн. наук, проф. *В. М. Рябенський*