

## НАНОСЕКУНДНЫЙ ГЕНЕРАТОР ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ ИМПУЛЬСОВ НА ОСНОВЕ ИСКУССТВЕННЫХ ДВОЙНЫХ ФОРМИРУЮЩИХ ЛИНИЙ

© 2020 г. В. А. Бурцев<sup>а</sup>, А. А. Бурцев<sup>б</sup>, Д. Б. Бельский<sup>б</sup>, Е. П. Большаков<sup>б,\*</sup>,  
Т. П. Бронзов<sup>б</sup>, С. А. Ваганов<sup>а</sup>, Д. В. Гетман<sup>с</sup>, С. И. Елисеев<sup>б</sup>, Н. В. Калинин<sup>а</sup>,  
А. А. Самохвалов<sup>б</sup>, К. А. Сергушичев<sup>б</sup>, А. А. Смирнов<sup>б</sup>, М. В. Тимшина<sup>а,\*\*</sup>

<sup>а</sup> Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН,  
194021, С.-Петербург, ул. Политехническая, 26, Россия

<sup>б</sup> ООО “Лаборатория им. В.А. Бурцева”, С.-Петербург, Россия

<sup>с</sup> НИИ электрофизической аппаратуры им. Д.В. Ефремова, С.-Петербург, Россия

\*e-mail: bolepr@inbox.ru

\*\*e-mail: mariyatimshina@yandex.ru

Поступила в редакцию 05.01.2020 г.

После доработки 31.01.2020 г.

Принята к публикации 06.02.2020 г.

Приведены результаты экспериментальных исследований компактного генератора высоковольтных импульсов. Генератор выполнен на основе двух искусственных двойных формирующих линий по свернутой схеме, коммутируемых газовыми разрядниками, и также содержит обостряющий газовый разрядник, передающие линии с жидким диэлектриком и эквивалент нагрузки. Исследованы характеристики такого генератора в диапазоне зарядного напряжения до 100 кВ. При длительности импульса напряжения с формирующей линии 100 нс на омической нагрузке получены импульсы тока амплитудой 18 кА с длительностью фронта порядка 18 нс.

DOI: 10.31857/S0032816220040114

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Генераторы наносекундных высоковольтных импульсов широко применяются во многих современных областях науки и техники, включая лазеры и электронные ускорители. Несмотря на то, что основные методы формирования наносекундных импульсов высокого напряжения хорошо известны с 70-х годов прошлого века [1], быстроразвивающиеся направления современной физики и техники требуют постоянного совершенствования формирующих схем и улучшения параметров генерируемых импульсов.

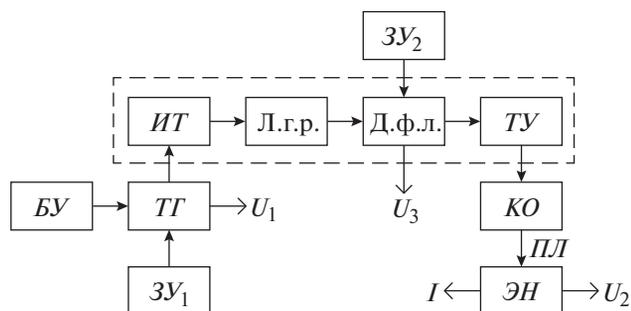
Одним из способов создания энергоемких компактных генераторов высоковольтных импульсов с короткими фронтами является применение емкостных накопителей со свойствами формирующих линий. В [2] этот способ осуществлен с использованием керамических конденсаторов. Дальнейшим шагом в создании мощных высоковольтных генераторов является использование искусственных формирующих линий на рулонных секциях малоиндуктивных конденсаторов с развинутой поверхностью фольговых обкладок, обладающих более чем на порядок большей плотностью запасаемой энергии.

В данной работе анализируются результаты разработки и создания компактных генераторов для применения в разных областях физики высоких плотностей энергии и, в частности, для многодиапазонных источников излучения на основе малоиндуктивных протяженных капиллярных Z-разрядов. К ним относится создаваемая в настоящее время в ФТИ им. А.Ф. Иоффе уникальная многоцелевая компактная установка “Экстрим-Микро”, основной частью которой является рассматриваемый высоковольтный генератор.

Нами обоснован и сделан выбор в пользу искусственных формирующих линий на рулонных секциях малоиндуктивных конденсаторов как обладающих большей плотностью запасаемой энергии. Из практических соображений в качестве обострителей импульсов выбраны газовые разрядные устройства различных конфигураций, разделенные отрезками коаксиальных передающих линий.

### 2. КОМПЛЕКТАЦИЯ ГЕНЕРАТОРА

Первый положительный опыт применения высоковольтных генераторов на рулонных секциях для питания Z-разрядов капиллярного типа был получен в ходе поддержанных РФФИ работ



**Рис. 1.** Блок-схема генератора с одним энергетическим каналом (энергетический канал выделен штриховой линией). ЗУ – зарядное устройство, ТГ – тиратронный генератор, БУ – блок управления, ИТ – импульсный трансформатор (с коэффициентом трансформации 1:3), л.г.р. – линейный газовый разрядник, д.ф.л. – двойная формирующая линия, ТУ – токосборный узел, КО – кольцевой обостритель, ЭН – эквивалент нагрузки, ПЛ – передающая линия. Стрелками обозначены каналы сбора данных (осциллограммы напряжения и тока).

по созданию источников излучений высокой яркости в коротковолновом спектральном диапазоне [3]. Для выполнения этих работ на кафедре техники высоких напряжений, электроизоляционной и кабельной техники Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого была изготовлена четырехзвенная искусственная двойная формирующая линия (д.ф.л.) на рулонных секциях с общим волновым сопротивлением 8 Ом.

Д.ф.л. состояла из двух одинарных четырехзвенных линий, расположенных одна над другой по свернутой схеме с выводами на противоположных сторонах вмещающего линию пластмассового прямоугольного корпуса. Выходные электроды подсоединялись к обостряющему коммутатору, входные электроды с помощью медных шин – к пусковому разряднику. Все конденсаторы линий заряжались параллельно от высоковольтного источника с отрицательной полярностью выходного напряжения, подаваемого на среднюю шину д.ф.л.

На основе этой д.ф.л. создан генератор высоковольтных импульсов с использованием управляемого линейного газового разрядника (л.г.р.) с искажением электрического поля на входе линии и аналогичного л.г.р., работающего в режиме самопробоя, на выходе линии.

Результаты экспериментов с таким генератором [3] показали возможность генерации интенсивных излучений в широком спектральном диапазоне, включающем жесткое и мягкое рентгеновское излучение.

Для продвижения же в область более коротких длин волн, причем с получением большой спектральной яркости, необходимо повышение мощ-



**Рис. 2.** Внешний вид генератора с кольцевым обострителем КО и эквивалентом нагрузки ЭН. Бак содержит две д.ф.л., два импульсных трансформатора, два л.г.р. и токосборный узел.

ности накачки. Это послужило основанием для создания более мощного генератора следующего поколения, который и описывается в данной работе.

На рис. 1 приведена блок-схема разработанного генератора, где показаны основные части для одного энергетического канала (всего их два). Каждый энергетический канал состоит из импульсного трансформатора (ИТ), линейного газового разрядника, двойной формирующей линии и общего для двух каналов токосборного узла (ТУ). Таким образом, в генераторе используются две д.ф.л. (в дальнейшем для увеличения запасаемой энергии планируется добавить еще две), которые собраны из рулонных конденсаторных линий.

Выходы д.ф.л. соединяются параллельно при помощи токосборного узла, выполненного в виде секции коаксиальной линии с масляной изоляцией. Общее волновое сопротивление линий составляет около 7 Ом. При зарядном напряжении 100 кВ запас энергии одной линии около 100 Дж. В качестве высоковольтного зарядного устройства (ЗУ<sub>2</sub>) для д.ф.л. использовался высоковольтный источник SLPN300/10002 производства Spellman High Voltage Electronics Corporation (США).

Токосборный узел, д.ф.л. и элементы запускающих систем линейных коммутаторов на входе линий помещены в общий бак, заполненный трансформаторным маслом (рис. 2). Тиратронный генератор выполнен на основе тиратрона ТПИ1-10к/50 с ненакаливаемым катодом и анодным напряжением до 50 кВ производства ООО “Импульсные технологии”, (г. Рязань, Россия). Вместе с накопительным конденсатором К15-10 (12 нФ) тиратрон размещен в компактном корпусе.

При выборе схемы коммутации д.ф.л. исходным требованием является отрицательная полярность высоковольтного электрода электроразрядной капиллярной нагрузки (это связано с необходимостью возникновения взрывной эмиссии с

кромки катодного электрода и формирования скользящего лавинного разряда для предварительной ионизации газа при использовании описываемого генератора для капиллярной нагрузки [3]). Поэтому формирующие линии должны синхронно выдавать импульсы напряжения отрицательной полярности. Сформированные линии импульсы через полосковые малоиндуктивные соединения собираются в токосборном узле и поступают на коаксиальный газовый обостритель (или кольцевой обостритель *КО*, рис. 1), где происходит их компрессия, и далее через коаксиальную передающую линию (*ПЛ*) подключаются к эквиваленту нагрузки (*ЭН*).

Важным условием синхронной работы двух формирующих линий является их коммутация с минимальным разбросом. Для коммутации линий используются трехэлектродные л.г.р., управляемые по принципу искажения электрического поля.

### 2.1. Линейные газовые разрядники

Несмотря на значительные успехи в развитии высоковольтных коммутаторов других типов [4], газовые разрядники остаются наиболее востребованными в случаях, когда требуемая частота следования разрядных импульсов не превышает 100 Гц (в непродуваемых разрядниках) и когда, обладая сравнительно невысокой стоимостью, разрядники обеспечивают коммутацию больших импульсных токов за малое время (до 200 А/нс) при высоких значениях рабочих напряжений.

Для требуемых рабочих диапазонов статических напряжений от 10 до 100 кВ, токов от 10 до 100 кА, собственной индуктивности коммутаторов от единиц до 10 нГн были выбраны двухкаскадные газовые коммутаторы и обострители с искажением электрического поля [5].

Для коммутации на входных электродах верхних линий д.ф.л. был сконструирован и изготовлен двухкаскадный л.г.р. с искажением электрического поля [6]. Цилиндрический корпус л.г.р. выполнен из прозрачного оргстекла, что позволяет фотографировать внутреннее пространство разрядника. Камера разрядника заполняется азотом с добавкой аргона, состав смеси подбирается для рабочих значений напряжения заряда д.ф.л. Электроды разрядника выполнены из латуни.

Основные разрядные электроды длиной 25 см имеют полуцилиндрическую форму. Средний пусковой электрод, на который подаются поджигающие импульсы, имеет в поперечном сечении клинообразную форму с острой кромкой, профилированной прямоугольными вырезами с шагом 1 см, на углах которых возникает дополнительное искажение электрического поля, способствующее развитию многоканального разряда. Поперечное сечение л.г.р. показано на рис. 3а.

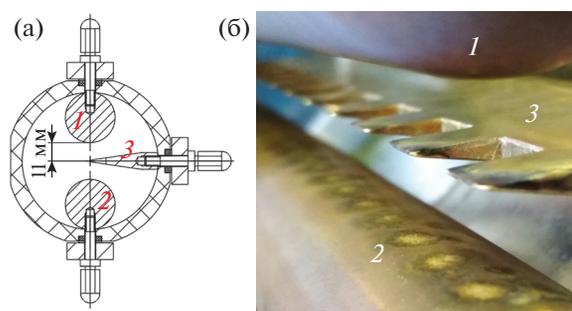
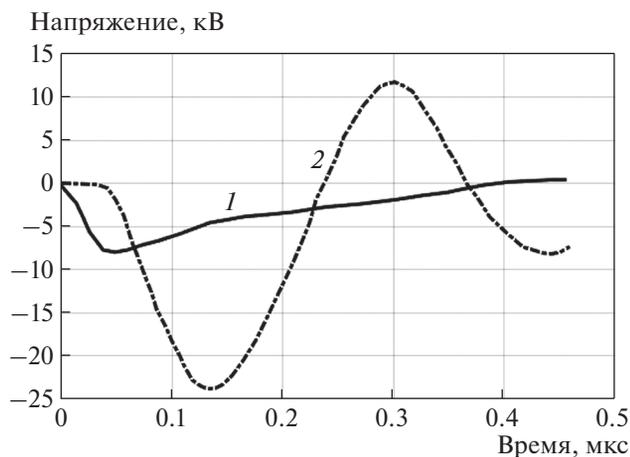


Рис. 3. а – вид поперечного сечения л.г.р.; б – внешний вид электродов линейного разрядника с характерными эрозийными следами от разрядов. 1 – основной заземленный электрод, 2 – основной электрод под отрицательным потенциалом, 3 – средний электрод.

Многоканальный режим возникновения и протекания разряда позволяет снизить локальную эрозию электродов, уменьшить собственную индуктивность разрядника и сократить статистический разброс времени срабатывания разрядника  $\sigma$ . Внешний вид электродов линейного разрядника приведена на рис. 3б, где видно, что эрозионные следы разрядов на основном электроде расположены достаточно равномерно по всей длине в зонах пазов среднего электрода.

При подаче поджигающих импульсов отрицательной полярности на средний электрод разрядника в его верхнем зазоре длиной 1.1 см возникает перенапряжение, и происходит его пробой, после чего к нижнему зазору разрядника длиной 1.1 см с д.ф.л. прикладывается полное зарядное напряжение  $U_0$ , что вновь провоцирует пробой разрядника. Как уже отмечалось, формированию многоканального разряда и выравниванию эрозии электродов способствуют прямоугольные прорезы в среднем электроде, на углах которых возникает взрывная эмиссия электронов. Если  $U_0$  несколько превышает статическое напряжение пробоя нижнего промежутка, то в условиях его засветки и фотоэмиссии на нижнем электроде происходит срабатывание разрядника с минимальной задержкой.

Но основным путем обеспечения предельно малых  $\sigma$  является использование управляющих импульсов, в 2–3 раза превышающих  $U_0$  при возможно большей скорости нарастания напряжения ( $\geq 10^{13}$  В/с) [5]. Для уверенного формирования многоканального разряда в линейных разрядниках амплитуда поджигающего импульса отрицательной полярности должна быть не менее двойного зарядного напряжения линий  $U_0$  [5]. При этом напряженность электрического поля в верхнем зазоре, равном 1 см, составит в среднем  $2.5 \cdot 10^5$  В/см, а в районе острий среднего электрода не менее  $2.5 \cdot 10^7$  В/см, что достаточно для возникно-



**Рис. 4.** Осциллограммы импульсов напряжений на выходе тиратронного генератора (1) и на пусковом электроде линейного разрядника (2), снятые при зарядном напряжении тиратрона 8 кВ.

вения взрывной эмиссии и формирования многоканального разряда в коммутаторе.

Для обеспечения такого удвоения-утроения напряжения используется импульсный трансформатор с коэффициентом трансформации 1:3. На рис. 4 приведены импульсы напряжения на выходе тиратронного запускающего генератора и напряжения на пусковом электроде линейного разрядника, откуда видно, что напряжение с тиратронного генератора передается на пусковой электрод л.г.р. через кабельный трансформатор как раз с коэффициентом 1:3. Сигналы напряжений зарегистрированы при 8 кВ зарядного напряжения накопительного конденсатора тиратронного генератора.

Образование и развитие параллельных разрядных каналов возможно из-за конечной скорости роста проводимости каналов и, следовательно, конечного времени уменьшения на них напряжения и шунтирования соседних каналов. Важное значение приобретает небольшая задержка времени изменения напряжения на электродах, что может обеспечиваться шунтированием промежутков малоиндуктивными конденсаторами малой емкости [7]. Это может оказаться полезным также для подпитки вновь образующихся пробойных искр, что будет способствовать многоканальному режиму работы разрядника. В работе [8] для этого использовались конденсаторы емкостью 25 пФ.

В работе [9] при коммутации токов до 4 МА наблюдалось 40–70 каналов на длине электродов >1 м. В нашей работе [10] при такой же длине электродов путем анализа эрозионных пятен наблюдалось порядка 100 каналов. Для анализа влияния шунтирующих конденсаторов на “канальность” разряда проводилось фотографирование разряда в разряднике с торца и сбоку с использованием



**Рис. 5.** Фотографии многоканального разряда в л.г.р. без дополнительных шунтирующих конденсаторов по 2.3 пФ (а) и с ними (б). Без использования конденсаторов количество наблюдаемых каналов 4, с использованием — 10.

нейтральных фильтров, чтобы избежать засвечивания изображения. Продемонстрировано положительное влияние дежурных конденсаторов на “канальность” разряда. На рис. 5 показаны фотографии многоканального разряда сбоку без и с установкой четырех конденсаторов по 2.3 пФ, где видно, что с дополнительными конденсаторами количество каналов увеличивается больше, чем в два раза.

## 2.2. Кольцевой обостритель

Кольцевой обостритель также представляет собой газовый разрядник с тремя электродами. Основные разрядные электроды имеют торообразную форму, средний электрод выполнен в виде плоского диска с заостренной кромкой. Зазор между электродами равен 1 см. Средний электрод находится под плавающим потенциалом. Высоковольтная изоляция выполнена из органического стекла. Предусмотрено два режима работы обострителя: неуправляемый, осуществляющийся за счет самопробоя газовых промежутков, и управляемый, при котором на промежуточный электрод подается высоковольтный импульс напряжения.

При проектировании обострителя был выполнен расчет электростатических полей высоковольтной структуры, результаты которого позволили выбрать конструкцию обострителя без областей со сверхвысокими электрическими полями, приводящих к пробоям изоляции. Распределение электростатического поля в обострителе в момент времени, предшествующий пробоем разрядника, приведено на рис. 6.

В расчете принято, что деление напряжения происходит по межэлектродным емкостям. Первым пробивается левый промежуток, затем из-за перенапряжения пробивается правый промежуток. Временные задержки пробоев промежутков вызывают эффект обострения проходящей волны напряжения. Изменяя давление и состав газовой смеси в камере обострителя, можно управлять этим эффектом. Для заполнения камеры обострителя газовой смесью в его корпусе предусмотрены штуцера.

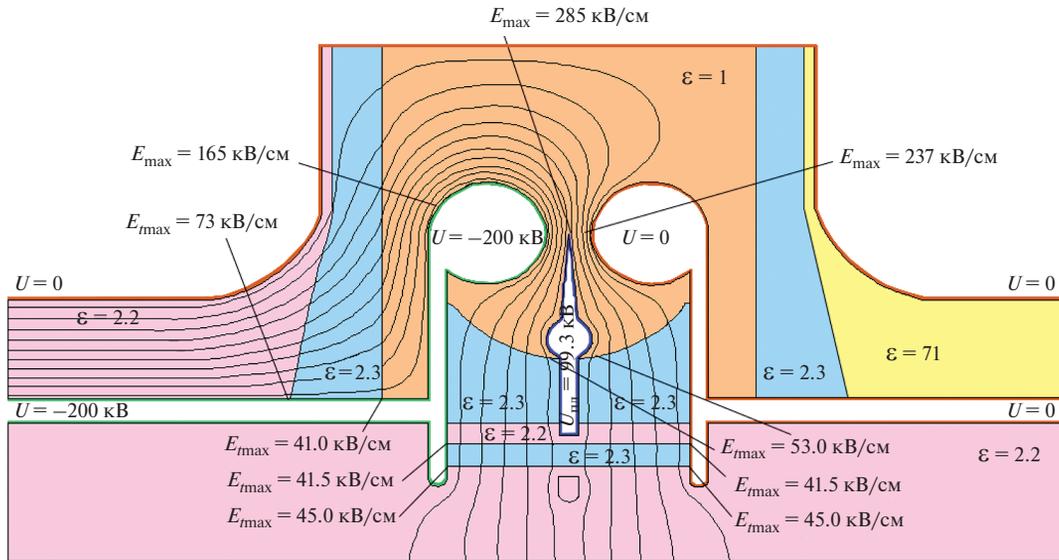


Рис. 6. Распределение линий постоянного электрического потенциала в кольцевом обострителе в момент времени, предшествующий пробоем разрядника.  $U$  – потенциал на электродах;  $\epsilon$  – диэлектрические проницаемости сред; напряженности электрического поля в наиболее важных точках:  $E_{max}$  – максимумы модуля напряженности электрического поля на границе сред,  $E_{max}$  – максимумы модуля напряженности электрического поля в “объеме”.

### 2.3. Коаксиальная передающая линия и эквивалент нагрузки

Длина коаксиальной передающей линии 270 мм, диаметр внешнего электрода 128 мм, диаметр внутреннего электрода 80 мм. Линия заполнена смесью глицерина и воды, ее волновое сопротивление составляет 3.54 Ом. Напряжение на передающей линии регистрируется при помощи емкостного делителя.

Эквивалент нагрузки выполнен из сопротивлений ТВО-10 Вт. Общее сопротивление эквивалента нагрузки с учетом омического делителя составляет 4.2 Ом. Внешней изоляцией является глицериновая смесь с водой. Ток через эквивалент нагрузки регистрируется при помощи магнитоиндукционного датчика (пояс Роговского).

## 3. ХАРАКТЕРИСТИКИ ГЕНЕРАТОРА

Проведены измерения параметров генератора высоковольтных импульсов при коммутации двух д.ф.л. в различных режимах работы на эквивалент нагрузки. Линейные разрядники наполнялись азотом под давлением в диапазоне 1–3 бар, кольцевой обостритель азотом под давлением в диапазоне 0–1 бар. Характерные сигналы напряжений и тока генератора при работе на эквивалент нагрузки приведены на рис. 7.

При зарядном напряжении д.ф.л., равном 75 кВ, амплитуда сигнала с омического делителя на выходе д.ф.л. соответствует напряжению на ее выходе, равному 75.9 кВ. Длительность фронта импульса напряжения на выходе д.ф.л. примерно 40 нс.

Видно, что кольцевой обостритель сжимает фронт импульса напряжения до 16 нс. Длительность фронта импульса тока в нагрузке, зарегистрированного индукционным датчиком (пояс Роговского), примерно 18 нс при амплитуде около 18 кА. Небольшой всплеск напряжения на эквиваленте нагрузки (~0.3 мкс на рис. 7) связан с частичными разрядами, возникающими в кольцевом обострителе; формы огибающих сигналов тока и напряжения на эквивалентной нагрузке подобны.

С помощью м.р.г.д.-модели (магнитно-радиационно-гидродинамической) был проведен расчет характеристик малоиндуктивного сильноточ-

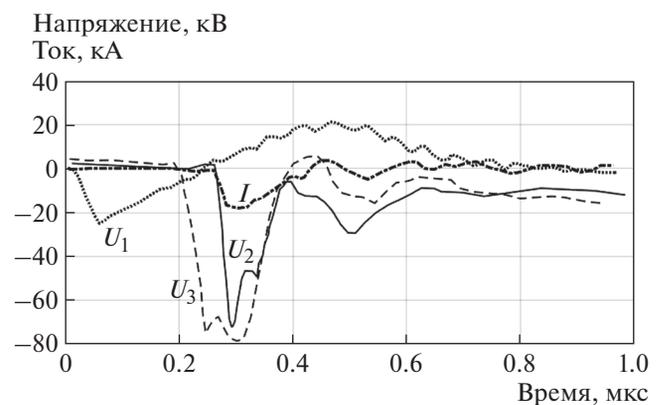
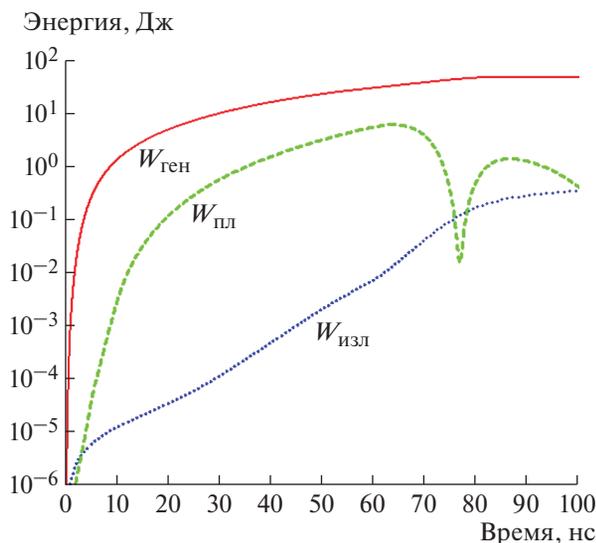


Рис. 7. Выходные осциллограммы, снятые с каналов сбора данных:  $U_1$  – напряжение на тиратроне,  $U_2$  – напряжение на эквиваленте нагрузки,  $U_3$  – напряжение на д.ф.л.,  $I$  – ток на эквиваленте нагрузки.



**Рис. 8.** Результаты м.г.р.д.-расчетов капиллярного Z-разряда для условий, задаваемых разработанным генератором.  $W_{ген}$  — энергия, переданная генератором в плазменную капиллярную нагрузку,  $W_{пл}$  — энергия, перешедшая в кинетическую энергию плазмы,  $W_{изл}$  — энергия излучения.

ного Z-разряда капиллярного типа (плазменная нагрузка) для условий, обеспечиваемых разработанным генератором. Аналогичные расчеты проводились в [11]. В текущих расчетах рассматривался капилляр длиной 5 см с внутренним диаметром 5 мм, заполненный аргоном при начальном давлении 1 Торр. Результаты расчетов для волнового сопротивления передающей линии 4 Ом представлены на рис. 8. На этом рисунке приведены графики временных зависимостей энергии, переданной генератором в нагрузку (к моменту максимального сжатия плазмы равной ~48 Дж), кинетической энергии плазмы и энергии полученного излучения в спектральной области <100 нм.

#### 4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Экспериментальные исследования наносекундного генератора высоковольтных импульсов на основе двух искусственных д.ф.л. продемонстрировали возможность получения на д.ф.л. напряжения с амплитудой 75 кВ, длительностью импульса 100 нс и фронтом 40 нс с дальнейшим обострением фронта импульса вплоть до 16 нс. На эквиваленте нагрузки это позволяет получать ток с амплитудой 18 кА и фронтом порядка 18 нс. Расчеты капиллярной нагрузки показывают возможность с помощью такого генератора вкладывать ~48 Дж в плазменную нагрузку, что достаточно для наблюдения излучения в спектральном диапазоне <100 нм.

Ключевой принцип построения генератора на искусственных д.ф.л. из рулонных секций малоиндуктивных конденсаторов, а также технические решения, использованные при разработке генератора, могут быть успешно применены при создании мощных компактных генераторов импульсов высокого напряжения с фронтом порядка нескольких наносекунд и током до 30 кА для использования в различных областях физики и техники, где требуются высокие плотности запасаемой энергии.

#### БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы благодарны Н. Лекомцевой, сотруднице НИИЭФА им. Д.В. Ефремова, за моделирование и оптимизацию электростатических полей в обострителях.

#### ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнялась при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований в рамках проекта № 18-08-01066.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Месяц Г.А.* Генерирование мощных наносекундных импульсов. М.: Сов. радио, 1974.
2. Накопление и коммутация энергии больших плотностей / Под ред. У. Бостика, В. Нарди, О. Цукера. М.: Мир, 1979.
3. *Бурцев В.А., Большаков Е.П., Гетман Д.В., Лекомцева Н.Г., Чернобровин В.И.* // ЖТФ. 2011. Т. 81. Вып. 7. С. 49.
4. *Бохан П.А., Гугин П.П., Закревский Д.Э., Лаврухин, М.А.* // ЖТФ. 2015. Т. 85. Вып. 10. С. 50.
5. *Кучинский Г.С., Шкуронат П.И., Шнеерсон Г.А.* // Сб. статей Ин-та атомной энергии им. И.В. Курчатова / Под ред. Е.П. Велихова. М.: Энергоатомиздат, 1987. С. 127–165.
6. *Большаков Е.П., Бурцев В.А.* Патент на изобретение 2247453 РФ // Оpubл. 27.02.2005. Бюл. № 6.
7. *Кичаева Г.С., Шкуронат П.И.* // Изв. вузов. Сер. Энергетика. 1961. № 2. С. 34.
8. *Berkenhagen W.H., Gribble R.F., Hansborough L.D., Linford R.K., Melton J.G., Nunnally W.C.* // Proceedings of the Sixth Symposium on Engineering Problems of Fusion Research. 18–21 November 1975, San Diego, CA, USA. 1975. P. 676.
9. *Neil G.R., Post R.S.* // Rev. Sci. Instrum. 1978. V. 49. № 3. P. 401.  
<https://doi.org/10.1063/1.1135419>
10. *Burtsev V.B., Babalin A.I., Bol'shakov E.P., Dubianskiy V.A., Getman D.V., Kozlov V.P., Sedov A.V., Chernobrovин V.I., Pecherskiy O.P.* // Pulsed Power Plasma Science Conference (PPPS-2001). 17–22 June 2001, Las Vegas, Nevada, USA. IEEE. 2002. V. 1. P. 1750.  
<https://doi.org/10.1109/PPPS.2001.1001910>
11. *Бурцев В.А., Калинин Н.В.* // ЖТФ. 2013. Т. 83. Вып. 8. С. 20.