

## РАСЧЕТНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЫСОКОВОЛЬТНОГО ИМПУЛЬСНОГО ГЕНЕРАТОРА НА ФОРМИРУЮЩИХ ЛИНИЯХ

*Козлов Антон Александрович (otd4@expd.vniief.ru), Гордеев Вячеслав Серафимович,  
Турутин Максим Михайлович*

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», г. Саров Нижегородской обл.

Доклад посвящен расчету трехмерной модели высоковольтного импульсного генератора на ступенчатых формирующих линиях. Разработана новая конструктивная схема высоковольтного импульсного генератора. На основе результатов трехмерного моделирования переходных электрических процессов проведена оптимизация геометрических размеров линий с целью сокращения длительности выходного импульса напряжения.

**Ключевые слова:** импульсный ускоритель электронов, высоковольтный импульсный генератор, двойная ступенчатая формирующая линия.

## COMPUTATIONAL MODELING OF A HIGH-VOLTAGE PULSE GENERATOR ON FORMING LINES

*Kozlov Anton Alexandrovich (otd4@expd.vniief.ru), Gordeev Vyacheslav Serafimovich,  
Turutin Maxim Mikhailovich*

FSUE «RFNC-VNIIEF», Sarov Nizhny Novgorod region

The report is devoted to the calculation of a three-dimensional model of a high-voltage pulse generator on stepped forming lines. A new design scheme of a high-voltage pulse generator has been developed. Based on the results of three-dimensional simulation of transient electrical processes optimization of geometric sizes of lines was carried out in order to reduce the duration of the output voltage pulse.

**Key words:** pulsed electron accelerator, high-voltage pulse generator, double step forming line.

### Введение

В РФЯЦ-ВНИИЭФ ведутся работы по созданию сильноточного импульсного ускорителя электронов ОМЕГА [1]. Согласно проекту ускоритель, который состоит из последовательно установленных по оси типовых ускорительных секций, предполагается выполнить по схеме индукционного сумматора напряжения. Возможный вариант компоновки ускорительной секции показан на рис. 1. Индуктор суммирует импульсный ток, поступающий от четырех типовых высоковольтных генераторов, каждый из которых заряжается от своего генератора импульсных напряжений (ГИН).

Основной целью данной работы является выбор новой конструктивной схемы высоковольтного импульсного генератора, основанный на результатах

трехмерного моделирования переходных электрических процессов.

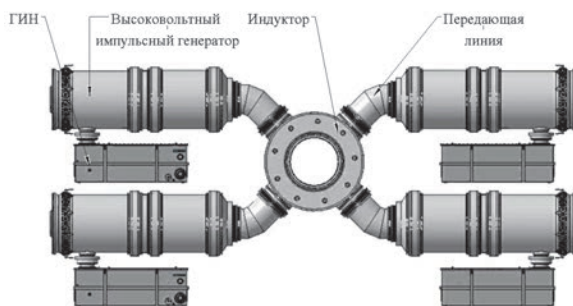


Рис. 1. Вариант компоновки ускорительной секции установки ОМЕГА

## Выбор конструктивной схемы высоковольтного импульсного генератора

Импульсные высоковольтные генераторы предложено выполнить на базе ступенчатых формирующих линий. Было рассмотрено два варианта схем. В первом варианте, на рис. 2, а представлена схема пятикаскадной двойной ступенчатой формирующей линии (ДСФЛ), хорошо зарекомендовавшая себя при создании сильноточных импульсных ускорителей электронов СТРАУС, СТРАУС-2, СТРАУС-Р и инжекторов линейных индукционных ускорителей ЛИУ-10М и ЛИУ-Р-Т [2].

Генератор состоит из 5 отрезков однородных линий одинаковой электрической длины  $T_0$  и работает следующим образом. В исходном состоянии линии с импедансами  $Z_1$ ,  $Z_2$ ,  $Z_3$  и  $Z_4$  заряжены до напряжения  $V_0$ . В момент времени  $t = 0$  коммутатор  $K_1$  замыкает входы линий 1 и 4. В результате волновых процессов на выходе ДСФЛ формируются импульсы напряжения чередующейся полярности. Рабочим является второй импульс. Нагрузка  $Z_n$  подключается к линии с импедансом  $Z_5$  коммутатором  $K_2$  в момент времени  $t = 4T_0$ . С точки зрения получения максимального КПД оптимальным является следующее соотношение импедансов каскадов:  $Z_1 : Z_2 : Z_3 : Z_4 : Z_5 = 1 : 3 : 15/4 : 5/4 : 15$ . В этом случае на согласованной нагрузке  $Z_{nc} = Z_5$  формируется одиночный импульс напряжения в идеальном случае прямоугольной формы амплитудой  $3V_0$  и длительностью  $2T_0$  в течение, которого запасенная в ДСФЛ энергия полностью передается в нагрузку. Импедансы могут варьироваться в достаточно широких пределах при сохранении высокого КПД.

Во втором варианте, рассмотрена схема, в которой для повышения тока было предложено встроить в выходной каскад преобразователь длительности, как это показано на рис. 2, б. Данная схема была экспериментально отработана на сильноточном импульсном ускорителе электронов «Гамма-1» [2]. В этом варианте электрическая длина выходного каскада уменьшается в 2 раза, а нагрузка подключается коммутатором  $K_2$  в момент времени  $t = 4,5T_0$ . При указанном выше соотношении импедансов генератор в идеальном случае обладает 100%-ным КПД. Амплитуда напряжения остается неизменной, а амплитуда выходного тока возрастает в 2 раза при сокращении длительности импульса также в 2 раза, с  $2T_0$  до  $T_0$ .

Для схемы с преобразователем длительности с целью дальнейшего повышения выходного тока проведена дополнительная оптимизация соотношения импедансов каскадов ДСФЛ. В качестве оптимального выбрано следующее соотношение:  $Z_1 : Z_2 : Z_3 : Z_4 : Z_5 = 1,125 : 2,375 : 2,375 : 1,0 : 11,0$ . В этом случае напряжение на согласованной нагрузке снижается до  $2,68V_0$ , а ток возрастает на 22 % при приемлемом уменьшении КПД на ~ 5 %.

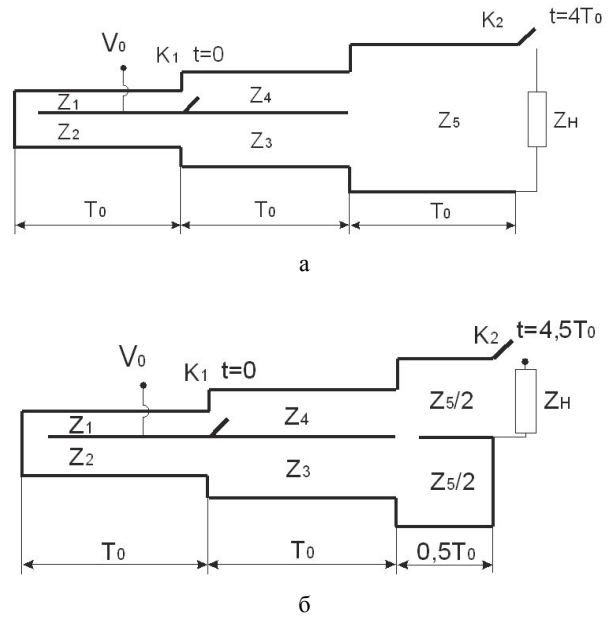


Рис. 2. Электрическая схема генератора на базе пятикаскадной ДСФЛ: а – без преобразователя длительности, б – с преобразователем длительности

При выборе схемы типового импульсного генератора ориентировались на амплитуду выходного напряжения около 2 МВ при амплитуде тока в установке ОМЕГА не менее 1 МА [1]. Поэтому в качестве основного варианта была выбрана схема генератора, выполненная на основе пятикаскадной ДСФЛ со встроенным в ее выходной каскад преобразователем длительности.

Конструкция, габаритные размеры и составные части генератора представлены на рис. 3. Он имеет коаксиальную конструкцию. Его основные узлы и конструктивные элементы расположены внутри цилиндрического корпуса диаметром 1200 мм. Генератор включает в свой состав ДСФЛ с многоканальным коммутатором и встроенным преобразователем длительности выходного импульса, а также предимпульсный коммутатор (ПК). ДСФЛ образована четырьмя секциями однородных линий с приблизительно равной электрической длиной, около 30 нс, уложенными последовательно по радиусу в пределах одного осевого размер. Импедансы линий (при отсчете от внешнего радиуса генератора к внутреннему) составляют соответственно 0,8; 0,9; 1,9 и 1,9 Ом. Электрическая емкость ДСФЛ приблизительно равна 100 нф. Импеданс линий преобразователя длительности равен 4,4 Ом. Подключение генератора ко входам индуктора осуществляется с помощью водяной передающей линии (ВПЛ) с импедансом равным волновому сопротивлению линии преобразователя длительности. Внутренние объемы ДСФЛ и ВПЛ заполняются деионизованной водой, используемой в качестве изолирующей среды.

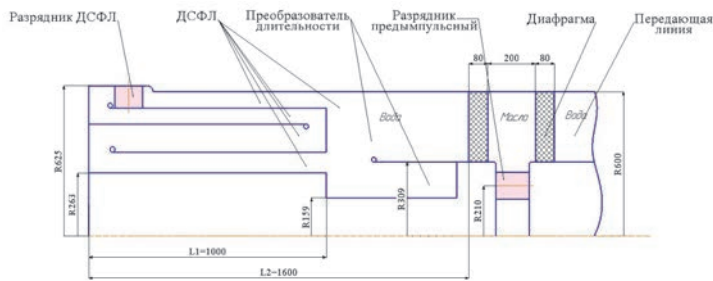


Рис. 3. Конструктивная схема генератора

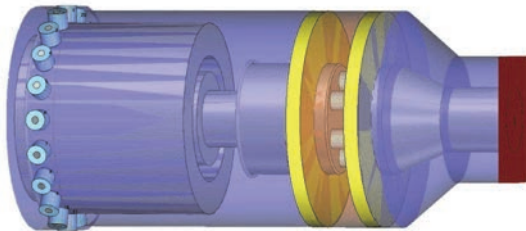


Рис. 4. Трехмерная расчетная модель генератора

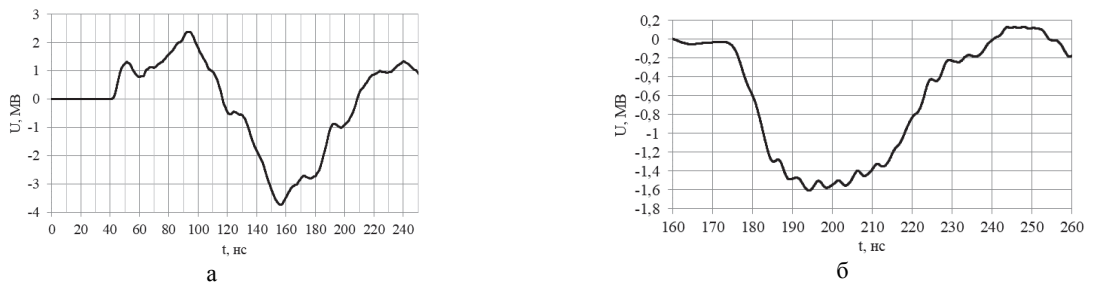


Рис. 5. Расчетная форма импульса напряжения: а – напряжение холостого хода на предимпульсном коммутаторе, б – напряжение на выходе генератора при включении предимпульсного коммутатора в момент времени  $t = 144$  нс

Коммутатор ДСФЛ образован 20-ю равномерно распределенными по окружности на внешнем диаметре корпуса ДСФЛ отдельными газонаполненными разрядниками тригatronного типа. Конструкция ПК генератора состоит из 6-ти разрядников тригatronного типа, расположенных равномерно по окружности диаметром 420 мм в маслonaполненном корпусе, отделенном от водяных объемов ДСФЛ и передающей линии полиэтиленовыми диафрагмами. Длина корпуса предимпульсного разрядника составляет 140 мм.

Для анализа переходных электрических процессов в ДСФЛ и расчета ее выходных электрических характеристик использовался модуль трехмерного моделирования электрофизических процессов CST Microwave Studio программы CST Studio Suite. Трехмерная расчетная модель высоковольтного импульсного генератора представлена на рис. 4.

На рис. 5, а показана расчетная форма импульса напряжения на предимпульсном коммутаторе в режиме холостого хода и на выходе генератора при включении предимпульсного коммутатора в момент времени  $t = 144$  нс, рис. 5, б. В момент срабатывания предимпульсного коммутатора напряжение на нем составляет 2,2 МВ, что приблизительно соответствует амплитуде первой полуволны. Во всех остальных

расчетах, представленных в работе, время включения ПК определялось величиной напряжения 2,2 МВ на фронте второй полуволны импульса напряжения, регистрируемого на ПК, в режиме холостого хода.

Согласно расчетам, формируется импульс напряжения амплитудой 1,61 МВ длительностью на полувысоте  $\sim 38$  нс. Амплитуда тока на согласованной нагрузке составляет  $\sim 365$  кА. Из первоначально запасенной в ДСФЛ электрической энергии  $\sim 25,3$  кДж в нагрузку передается  $\sim 17,6$  кДж, эффективность передачи составляет 69 %.

Индуктор представляет собой сумматор тока, поэтому согласно расчетной выходной амплитуде тока с одного генератора  $\sim 365$  кА, удастся добиться параметров тока не менее 1 МА с типовой ускорительной секции, включающей 4 высоковольтных импульсных генератора.

С точки зрения создания облучательной установки одной из основных характеристик является длительность импульса тормозного излучения на полувысоте  $-T_{0,5}$ . На данном этапе расчетов эту величину можно оценить по уровню импульса напряжения на уровне 0,8 от амплитудного значения. Для рассмотренной выше модели генератора с преобразователем длительности  $T_{0,5} \approx 30$  нс.

Если ориентироваться на получение более короткого импульса тормозного излучения на полувысоте, не более 20 нс, как у облучательной установки ЛИУ-30, то предполагаемая длина  $L_1$ , согласно результатам расчетов, не должно превышать 700 мм.

На рис. 6 приведена форма импульса выходного напряжения при включении предимпульсного коммутатора в момент времени  $t = 105$  нс. Амплитуда импульса выходного напряжения  $\sim 1,41$  МВ, длительность импульса на половине высоты  $\sim 28$  нс. Амплитуда тока на согласованной нагрузке  $\sim 320$  кА. Из первоначально запасенной в ДСФЛ электрической энергии  $\sim 17,4$  кДж в нагрузку передается  $\sim 9,5$  кДж, эффективность передачи составляет 55 %.

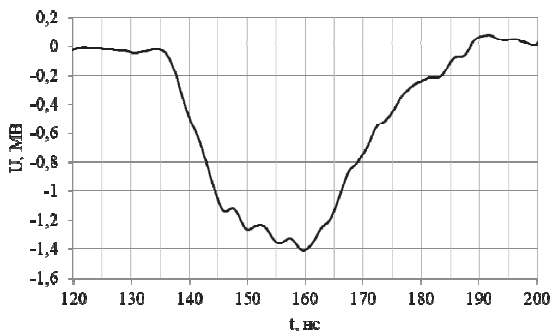


Рис. 6. Расчетная форма импульса напряжения на выходе генератора

Из представленных результатов видно, что при сокращении длительности импульса выходного напряжения и сохранении амплитуды тока ускорительной секции на уровне 1 МА снижается эффективность передачи энергии и падает темп ускорения. Поэтому было предложено рассмотреть также схему на базе пятикаскадной ДСФЛ без преобразователя длительности. Волновое сопротивление выходного каскада при этом составит 8,85 Ом. На рис. 7 представлена конструктивная схема генератора без преобразователя длительности. Электрическая длина линий ДСФЛ выбиралась равной  $\sim 15$  нс, таким образом, длина  $L_1 = 500$  мм, а  $L_2 = 1000$  мм.

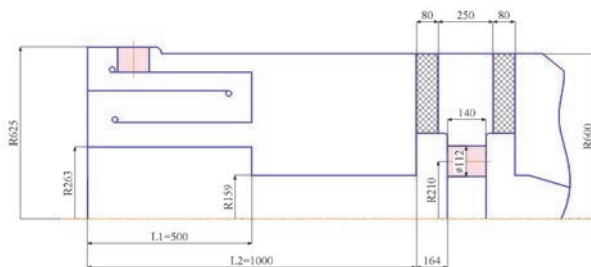


Рис. 7. Конструктивная схема генератора

На рис. 8, а показана расчетная форма импульса напряжения на предимпульсном коммутаторе в режиме холостого хода и на выходе генератора при включении предимпульсного коммутатора в момент времени  $t = 73$  нс, рис. 8, б.

Согласно расчетам, амплитуда импульса выходного напряжения составляет 1,78 МВ, длительность импульса на половине высоты  $\sim 27$  нс. Амплитуда тока на согласованной нагрузке  $\sim 202$  кА. Оценочная величина длительности импульса тормозного излучения составляет  $T_{0,5} \approx 17$  нс. Из первоначально запасенной в ДСФЛ электрической энергии  $\sim 12,7$  кДж в нагрузку передается  $\sim 6,6$  кДж, эффективность передачи составляет 52 %.

По результатам расчета можно сказать, что из-за сокращения длины линии выходного каскада осевой размер линии стал сравним с зазором линии, в результате чего наблюдается рассинхронизация электромагнитных волн, приходящих от многоканального коммутатора ДСФЛ к ПК по разным линиям. Основываясь на данном выводе, было решено увеличить электрическую длину пробега по верхней формирующей линии, путем включения в схему дополнительного высоковольтного электрода, а также увеличить осевой размер выходного каскада.

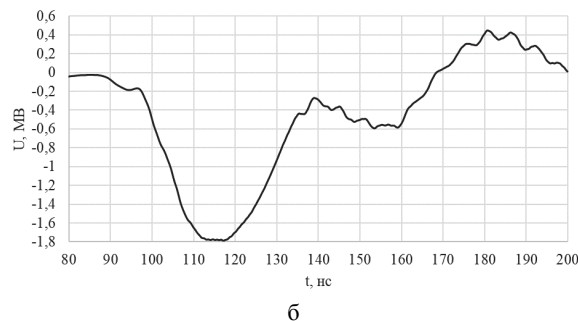
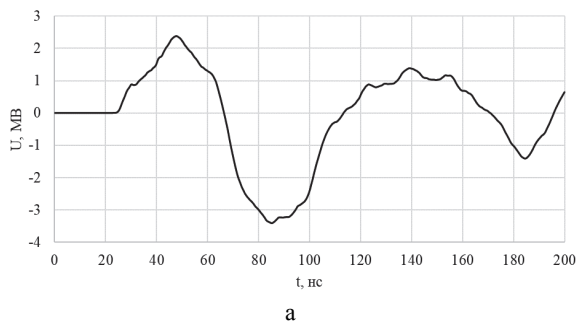


Рис. 8. Расчетная форма импульса напряжения: а – напряжение холостого хода на предимпульсном коммутаторе, б – напряжение на выходе генератора при включении предимпульсного коммутатора в момент времени  $t = 73$  нс



В соответствии с результатами расчетов амплитуда импульса выходного напряжения, соответствующая 4-м разрядникам ПК, составляет  $\sim 2$  МВ, длительность импульса на полувывсоте  $\sim 30$  нс. Длительности импульса тормозного излучения  $T_{0,5} \approx 20$  нс, а амплитуда выходного импульса тока составляет  $\sim 228$  кА и импульса мощности  $\sim 0,46$  ТВт. Из первоначально запасенной в ДСФЛ электрической энергии 14,5 кДж в нагрузку передается 10,6 кДж при эффективности передачи 73 %.

Таким образом, согласно представленным результатам численного моделирования высоковольтного импульсного генератора, для использования в составе макета ускорительной секции установки ОМЕГА, сделан выбор в пользу схемы на базе пятикаскадной ДСФЛ без преобразователя длительности с дополнительным высоковольтным электродом величиной 100 мм, длиной  $L_1 = 530$  мм и  $L_2 = 1160$  мм. В сравнении с конструктивной схемой с преобразователем длительности с величиной  $L_1 = 700$  мм выбранная схема, не смотря на снижение тока на  $\sim 30$  %, обладает большей эффективностью передачи энергии на 18 %, а самое главное повышенной на 42 % амплитудой ускоряющего напряжения.

### Заключение

В результате проведенной работы предложена новая конструктивная схема высоковольтного импульсного генератора. На основе результатов трехмерного моделирования переходных электрических процессов в формирующих линиях проведена оптими-

зация геометрических размеров. В частности, подобраны длины ДСФЛ таким образом, чтобы сократить длительность выходного импульса напряжения. Для повышения эффективности работы генератора, в конструктивной схеме без преобразователя длительности было предложено включить в схему дополнительный высоковольтный электрод длиной 100 мм, что позволило добиться согласованности по времени распространения волн в выходном каскаде формирующих линий.

Согласно расчетам, формируется импульс выходного напряжения амплитудой 2 МВ длительностью на полувывсоте  $\sim 30$  нс, при этом амплитуда тока на согласованной нагрузке составляет 230 кА. Оценочная длительность импульса тормозного излучения  $T_{0,5} \approx 20$  нс. При необходимости дополнительного сокращения длительности импульса необходимо задерживать время включения ПК.

### Список литературы

1. Ядерные и электрофизические установки РФЯЦ-ВНИИЭФ: настоящее и будущее. Будников Д. В., Воронцов С. В.// ВАНТ Сер. Физика ядерных реакторов. 2021. Вып. 4. С. 5–25.
2. Обзор сильноточных импульсных ускорителей электронов, созданных в РФЯЦ-ВНИИЭФ на базе ступенчатых линий. Басманов В. Ф., Гордеев В. С. и др.// Труды РФЯЦ-ВНИИЭФ. Научно-исследовательское издание. Саров: ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ». 2015. Вып. 20. С. 173–183.