УДК 621.373:621.396

Высоковольтные генераторы нано- и субнаносекундных импульсов

В. А. Балдыгин, А. А. Белошапко, И. Н. Григорьев, О. В. Давыдов, В. П. Лисицын, Л. Н. Моисеева, И. В. Мосин, И. А. Мысин, М. Г. Никифоров

Высоковольтный научно-исследовательский центр — филиал ГУП "Всероссийский электротехнический институт им. В. И. Ленина", г. Истра, Московская обл., Россия

Разработаны генераторы субнаносекундного диапазона однократных и повторяющихся импульсов напряжения на базе импульсных резонансных трансформаторов. Приведены расчеты конструкций генераторов, результаты моделирования процессов формирования электромагнитных импульсов в 2- и 3-мерных системах координат и осциллограммы выходных импульсов.

Генераторы высоковольтных нано- и субнаносекундных импульсов применяются в различных областях науки и техники, в частности, при формировании мощных электромагнитных полей для испытаний различных изделий и объектов на стойкость и электромагнитную совместимость. Амплитуда импульса напряженности электрического поля в испытательном объеме составляет несколько десятков или сотен кВ/м, длительность фронта — наносекунды или доли наносекунд*.

Установки, создающие такие поля, обычно состоят из высоковольтного импульсного генератора с коаксиальным выходом, коаксиально-полоскового перехода и отрезка согласованной полосковой линии больших размеров или излучателя.

Общий вид одного из таких генераторов представлен на рис. 1.

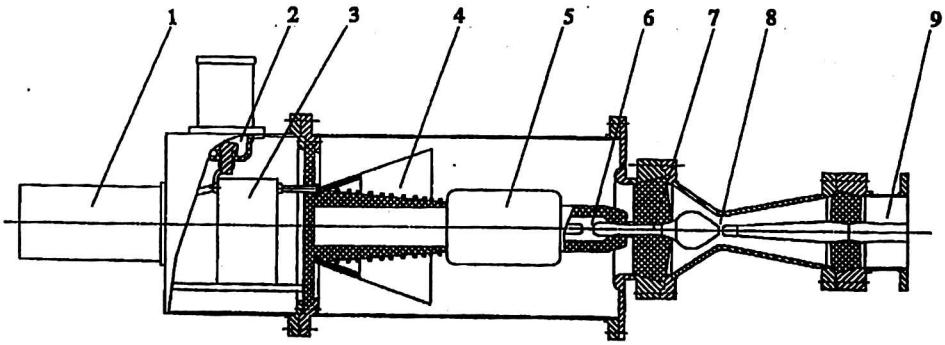

Рис. 1. Общий вид генератора однократных импульсов:
1 — зарядное устройство; 2 — коммутатор первичного контура; 3 — накопительный конденсатор; 4 — импульсный трансформатор; 5 — накопительная линия; 6 — коммутирующий разрядник; 7 — формирующая линия; 8 — обостряющий разрядник; 9 — выходная линия

* Dey S. and Mittra R. A locally conformal finite-difference time-domain (FDTD) algorithm for modeling three-dimensional perfectly conducting objects//IEEE Microwave and Guided Wave Letters. 1997. V. 7. No. 9. P. 273—275.

Источником высокого напряжения служит резонансный трансформатор с индуктивно связанными LC-контурами. Обмотки трансформатора имеют коническую форму и расположены в герметичном корпусе, заполненном трансформаторным маслом. Первичная обмотка выполнена из медной ленты с лавсановой межвитковой изоляцией и имеет индуктивность L_1 = 2,4 мкГн, вторичная обмотка намотана проводом ВНМ-0,5 и имеет индуктивность L_2 = 2 мГн.

Накопительная линия представляет собой отрезок коаксиальной линии, размещенной в корпусе импульсного трансформатора. На выходе накопительной линии установлен коммутирующий разрядник, расположенный в изоляционном корпусе высокой механической прочности. Конструкция разрядника позволяет производить изменение межэлектродного расстояния от 0 до 25 мм при давлении 6 МПа.

Формирующая линия расположена в корпусе обостряющего разрядника и формирует импульс длительностью на полуспаде около 3 нс. Обостряющий разрядник выполнен двухэлектродным в коническом корпусе, ограниченном проходными изоляторами; в качестве изоляционной среды используется смесь газов — азота и элегаза при избыточном давлении до 6 МПа. Межэлектродное расстояние обостряющего разрядника регулируется в пределах 0—10 мм.

Заряд накопительной емкости осуществляется от зарядного устройства, выполненного на базе силового высокочастотного инвертора и трансформаторно-выпрямительного блока. Частота инвертирования — 15 кГц.

При срабатывании разрядника первичного контура накопительный конденсатор разряжается через первичную обмотку импульсного трансформатора, при этом происходит заряд формирующей линии повышенным в десятки раз напряжением. После срабатывания коммутирующего и обостряющего разрядников в выходной коаксиальной линии с резисторной нагрузкой, равной волновому сопротивлению линии, формируется импульс напряжения.

Формирование на выходе генератора нано- и субнаносекундных импульсов требует тщательного расчета отдельных узлов генератора. Поскольку последние становятся соизмеримыми или превышают "световую длину" фронта формируемых импульсов, традиционные методы расчета генераторов с помощью теории цепей и длинных линий перестают работать.

Моделирование нестационарных электромагнитных процессов проводится с помощью разработанной программы, основанной на численном решении уравнений Максвелла методом конечных разностей во временной области. В программе использованы и развиты идеи "локально конформного" алгоритма, в котором видоизменяется форма ячеек расчетной сетки, граничащих с поверхностью металлического тела. Это приводит к изменению выражений для расчета составляющих магнитного поля — соответствующие интегралы вычисляются только по оставшейся части ячейки. Формулы для расчета составляющих электрического поля сохраняются.

В программе принята линейная аппроксимация границы металла в пределах грани ячейки. Нестандартные грани ячейки могут иметь форму треугольника, прямоугольника, трапеции или форму, получающуюся из квадрата путем удаления одного или двух несоседних угловых треугольников. Более точная аппроксимация границ проводников существенно увеличивает про-

странственный шаг дискретизации по сравнению с обычным конечно-разностным методом.

Пример расчетной геометрии высоковольтного генератора импульсов показан на рис. 2. Генератор рассчитывался по двумерному алгоритму с учетом осевой симметрии. Разрядники моделировались нитевидными нестационарными сопротивлениями. Шаг расчетной сетки — 10 мм.

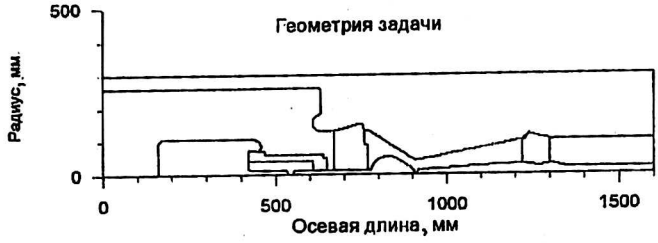

Рис. 2. Расчетная модель генератора

На рис. 3 приведены расчетная форма импульса на выходе генератора и осциллограмма выходного импульса (в отн. ед.). Параметры выходного импульса на нагрузке ($Z_н$ = 80 Ом) при зарядном напряжении 75 кВ следующие: амплитуда импульса — 2 МВ; длительность: импульса — 3 нс, фронта — 0,5 нс.

Рис. 3. Осциллограмма выходного импульса генератора однократных импульсов

Рассматриваемая здесь программа постоянно совершенствуется и используется для расчета временных и частотных характеристик не только высоковольтных генераторов одиночных импульсов, но и генераторов повторяющихся импульсов. Был разработан и испытан генератор колебательных импульсов, работающий в импульсно-периодическом режиме с частотой повторения импульсов в пачке до 500 Гц.

Общий вид генератора повторяющихся импульсов представлен на рис. 4, а его электрическая схема — на рис. 5. Для коммутации накопительного конденсатора первичного контура в частотном режиме применяется псевдоискровой разрядник ТП-10к/50. Импульсный резонансный трансформатор исполнен с разомкнутым магнитопроводом из ферритов марки 400НН. Первичная обмотка трансформатора выполнена из медной фольги толщиной 0,2 мм с лавсановой межвитковой изоляцией, вторичная обмотка намотана проводом ВНМ-0,5. В качестве изоляционной среды используется трансформаторное масло. Скорость нарастания выходного напряжения на трансформаторе составляет $3 \cdot 10^{12}$ В/с. Коммутирующий и срезающий разрядники

размещены в стальном корпусе и закреплены в изоляторах. Рабочий объем разрядников заполняется азотом при давлении до 10 МПа. Осциллограмма одного из повторяющихся с частотой 500 Гц выходных импульсов генератора представлена на рис. 6.

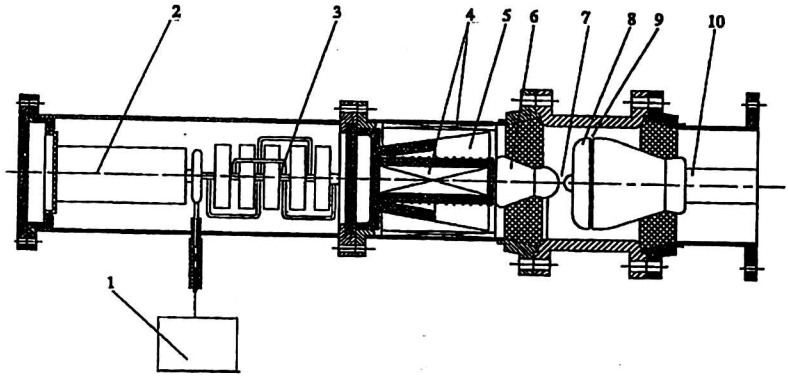

Рис. 4. Общий вид генератора повторяющихся импульсов:
1 — зарядное устройство; 2 — разрядник первичного контура;
3 — накопительные конденсаторы; 4 — ферритовый сердечник; 5; импульсный трансформатор;
6 — накопительная линия; 7 — коммутирующий разрядник; 8 — формирующая линия;
9 — обостряющий разрядник; 10 — выходная линия

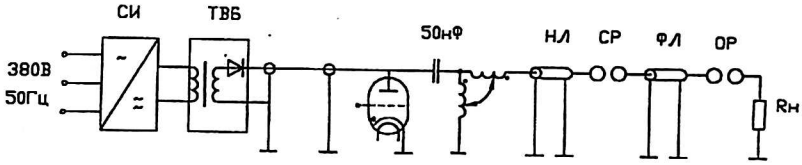

Рис. 5. Электрическая схема генератора

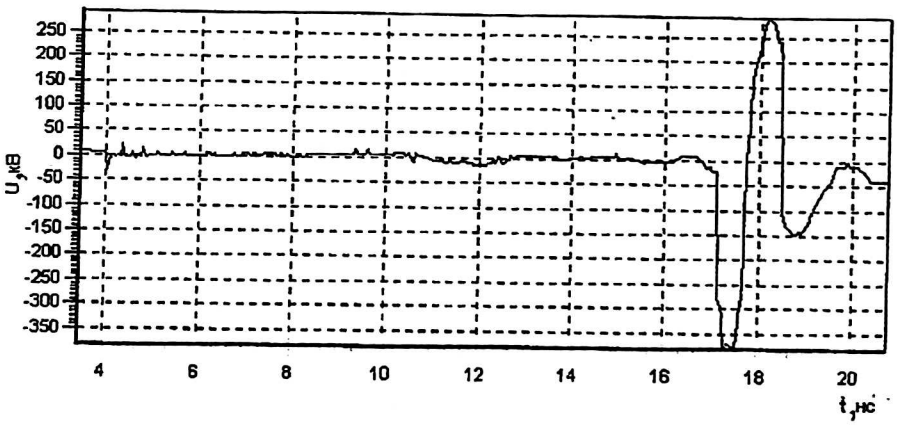

Рис. 6. Осциллограмма выходного импульса генератора повторяющихся импульсов

High-voltage generators of nano- and subnanosecond pulses

V. A. Baldygin, A. A. Beloshapko, I. N. Grigor'ev, O. V. Davydov, V. P. Lisitsyn, L. N. Moiseeva, I. V. Mosin, I. A. Mysin, M. G. Nikiforov

High Voltage Scientific and Research Center, Branch of The Lenin's All-Russian Electrotechnical Institute named, Istra, Moscow Region, Russia

Subnanosecond generators of single and repeating voltage pulses are developed on the basis of resonant transformers. Calculations of generator designs, results of modelling of electromagnetic pulses in 2D and 3D regions and oscillograms of output pulses are given.