

# РАСЧЕТ И ИЗМЕРЕНИЕ АМПЛИТУДНО-ВРЕМЕННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ ИМПУЛЬСОВ НАПРЯЖЕНИЯ СУБНАНОСЕКУНДНОГО УСКОРИТЕЛЯ ЭЛЕКТРОНОВ

*А. А. Селезнев, Т. В. Лойко, С. Л. Эльяш, А. Л. Юрьев*

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

## Введение

В настоящее время в РФЯЦ-ВНИИЭФ разрабатывается субнаносекундный ускоритель электронов с газонаполненным формирователем на базе малогабаритного ускорителя АРСА [1]. Согласно требованиям, предъявляемым к ускорителю, длительность субнаносекундного импульса тока электронов не должна превышать 0,3 нс при максимальной энергии электронов 800 кэВ. Ускоритель имеет небольшие габариты и прост в эксплуатации.

Ускоритель предназначен для:

- определения временного разрешения детекторов импульсного тормозного излучения субнаносекундной и наносекундной длительности;
- аттестации и контроля работоспособности скоростных измерительных каналов;
- исследования электрофизических характеристик (время жизни, подвижность носителей) широкозонных диэлектриков и перспективных полупроводниковых гетерогенных структур.

Целью работы являлись расчет и измерение амплитудно-временных характеристик высоковольтных импульсов напряжения в различных узлах субнаносекундного ускорителя электронов.

Расчет амплитудно-временных характеристик импульсов напряжения проводился в программе анализа электронных схем. Для этого построена электрическая схема замещения субнаносекундного ускорителя электронов. Расчет параметров элементов схемы замещения осуществлялся с помощью аналитических формул, а также с применением численных методов расчета в пакете программ для трехмерного моделирования физических процессов.

Регистрация высоковольтных импульсов напряжения нано- и субнаносекундной длительности производилась с помощью делителей напряжения с нано- и субнаносекундным временным разрешением [2].

Актуальность работы заключается в необходимости получения данных о характеристиках субнаносекундного ускорителя электронов и режимах его работы.

## Конструкция и принцип работы субнаносекундного ускорителя электронов

Внешний вид субнаносекундного ускорителя электронов приведен на рис. 1. Ускоритель состоит

из зарядного устройства 1 и высоковольтного блока ускорителя АРСА с установленным на нем формирователем субнаносекундных импульсов 3 с ускорительной трубкой СНИТ-1000 [2]. Для обеспечения устойчивости ускорителя служит стойка 4.

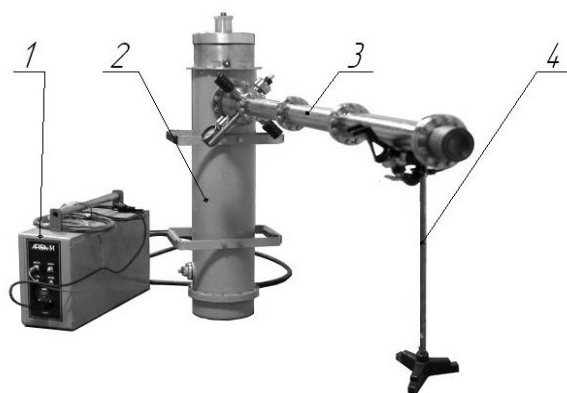


Рис. 1. Субнаносекундный ускоритель электронов: 1 – зарядное устройство; 2 – высоковольтный блок ускорителя АРСА; 3 – формирователь субнаносекундных импульсов; 4 – стойка

Высоковольтный блок ускорителя АРСА используется в качестве источника импульсов напряжения наносекундной длительности. С помощью формирователя 3 наносекундные импульсы преобразуются в высоковольтные импульсы субнаносекундной длительности, вызывая генерацию электронных пучков.

Конструкция формирователя субнаносекундных импульсов приведена на рис. 2.

Формирователь устанавливается на выходном патрубке 1 высоковольтного блока. Формирователь содержит узел обострения 2, короткую накопительную линию 3 и ступенчатую линию, разделенную на секции 4, 5 и 6 с волновыми сопротивлениями 18 Ом, 36 Ом и 60 Ом соответственно. В качестве изоляции линий применяется азот. Передающая линия подключена к ускорительной трубке 7. Для регистрации напряжения зарядки короткой накопительной линии 3, на корпусе узла 2 установлен емкостной делитель 8 с наносекундным разрешением. Регистрация импульсов напряжения на ускорительной трубке производится при помощи субнаносекундного емко-

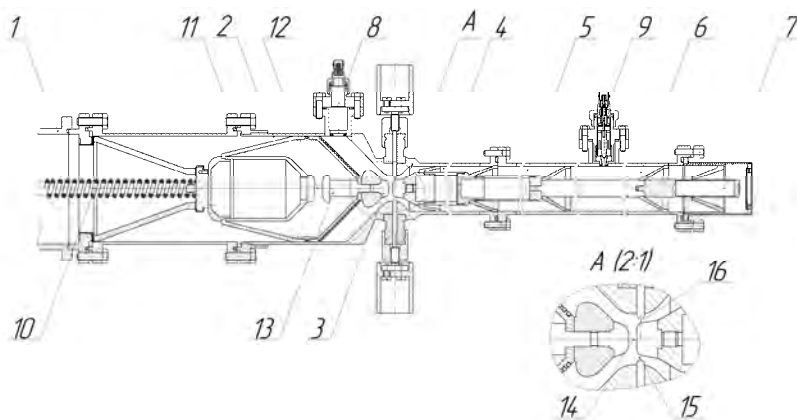


Рис. 2. Конструкция формирователя: 1 – выходной патрубок высоковольтного блока ускорителя АРСА; 2 – узел обострения; 3 – короткая накопительная линия; 4 – первая секция передающей линии (волновое сопротивление 18 Ом); 5 – вторая секция передающей линии (волновое сопротивление 36 Ом); 6 – третья секция передающей линии (волновое сопротивление 60 Ом); 7 – ускорительная трубка; 8, 9 – делители напряжения; 10 – развязывающая катушка индуктивности; 11 – формирующая линия; 12, 14 – межэлектродные зазоры обостряющих разрядников; 13 – промежуточная линия; 15, 16 – межэлектродные зазоры срезающих разрядников

стного делителя 9, установленного на расстоянии 300 мм от катода трубки.

Формирователь работает следующим образом. После срабатывания высоковольтного блока, на формирующую линию 11 через развязывающую катушку индуктивности 10 поступает импульс напряжения с длительностью фронта  $\tau < 10$  нс. При пробое межэлектродного зазора первого обостряющего разрядника 12 происходит зарядка короткой накопительной линии за время, меньшее 1 нс. После зарядки линии до максимального напряжения, межэлектродный зазор второго обостряющего разрядника 14 между короткой накопительной линией и передающей линией пробивается, и короткая накопительная линия разряжается на согласованную с ней первую секцию 4 передающей линии. Благодаря малой протяженности короткой накопительной линии 3, в передающей линии происходит формирование субнаносекундного импульса напряжения с амплитудой, вдвое меньшей амплитуды зарядки короткой накопительной линии. Этот импульс через ступенчатую линию поступает на ускорительную трубку, вызывая генерацию электронного излучения. Возрастание волновых сопротивлений секций ступенчатой линии и рассогласованный режим работы трубки (сопро-

тивление которой в несколько раз больше сопротивления последней секции передающей линии) приводит к возрастанию амплитуды напряжения на трубке практически до значения амплитуды зарядки короткой накопительной линии.

Межэлектродные зазоры срезающих разрядников 15 и 16 отрегулированы таким образом, чтобы их пробой осуществлялся на максимуме субнаносекундного импульса напряжения, замыкая на себя избытки энергии высоковольтного блока и укорачивая срез субнаносекундного импульса.

### Электрическая схема замещения ускорителя

Расчет амплитудно-временных характеристик субнаносекундного ускорителя проводился в программе анализа электронных схем. Для этого была составлена электрическая схема замещения субнаносекундного ускорителя электронов, которая состоит из схем замещения высоковольтного блока, формирователя и ускорительной трубки.

Схема замещения высоковольтного блока изображена на рис. 3, она представляет собой схему генератора Аркадьева – Маркса.

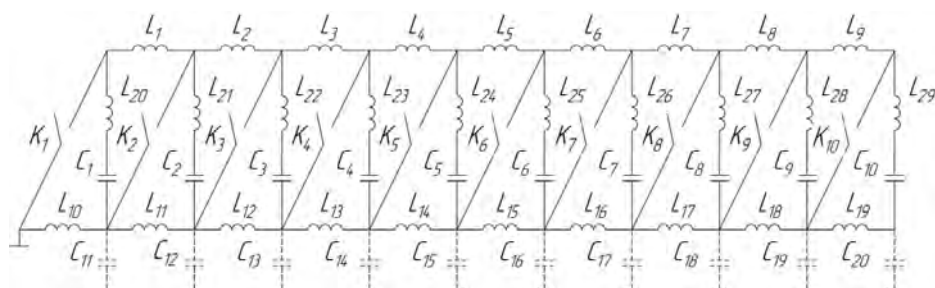


Рис. 3. Электрическая схема замещения высоковольтного блока:  $K_1$ – $K_{10}$  – коммутрующие разрядники,  $C_1$  –  $C_{10}$  – накопительные емкости (350 пФ),  $C_{11}$ – $C_{20}$  – паразитные емкости элементов конструкции на корпус (20 пФ),  $L_1$ – $L_{19}$  – зарядные индуктивности (20 мкГн),  $L_{20}$ – $L_{29}$  – паразитные индуктивности токоподводов (0,12 мкГн)

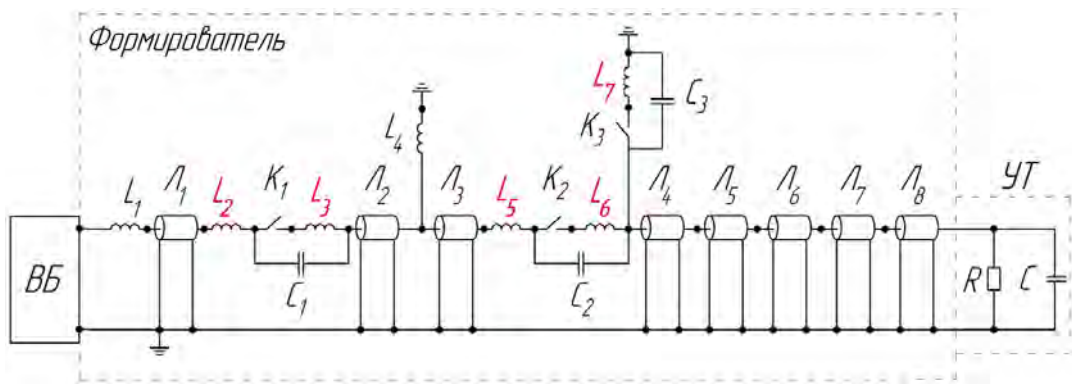


Рис. 4. Электрическая схема замещения субнаносекундного ускорителя:

- ВВ – высоковольтный блок
- УТ – ускорительная трубка
- Л1 – формирующая линия
- Л2 – промежуточная линия
- Л3 – короткая накопительная линия
- Л4–Л5 – переходные участки передающей линии
- Л6–Л8 – секции ступенчатой передающей линии
- Л1 – развязывающая катушка индуктивности (1 мкГн)
- Л2 – индуктивность электрода формирующей линии Л1 (7 нГн)
- Л3 – индуктивность электрода промежуточной линии Л2 (11,4 нГн)
- Л4 – заземляющая катушка индуктивности (10 мкГн)
- Л5 – индуктивность электрода короткой накопительной линии (5,2 нГн)

- Л6 – индуктивность электрода ступенчатой линии (10 нГн)
- Л7 – индуктивность электрода срезающего разрядника (2,3 нГн)
- С1 – межэлектродная емкость первого обостряющего разрядника (0,6 пФ)
- С2 – межэлектродная емкость второго обостряющего разрядника (0,25 пФ)
- С3 – межэлектродная емкость срезающего разрядника (0,03 пФ)
- К1 – ключ, имитирующий первый обостряющий разрядник
- К2 – ключ, имитирующий второй обостряющий разрядник
- К3 – ключ, имитирующий срезающий разрядник
- Р – сопротивление ускорительной трубки (200 Ом)
- С – межэлектродная емкость ускорительной трубки ( $\approx 0,3$  пФ)

В данной работе процесс зарядки накопительных емкостей  $C_1 - C_{10}$  не рассматривался. Считалось, что в начальный момент времени все накопительные емкости заряжены до напряжения 100 кВ. Имитация срабатывания разрядников осуществлялась при помощи ключей  $K_1 - K_{10}$ : ключ  $K_1$  замыкался в начальный момент времени, ключ  $K_2$  – при достижении на нем напряжения 120 кВ, остальные ключи замыкались при достижении на них напряжения 140 кВ.

Схема замещения формирователя (рис. 4) содержит линии (Л1 – Л8), индуктивности развязывающей (L1) и заземляющей (L4) катушек, а также паразитные индуктивности элементов разрядников (L2, L3, L5, L6 и L7) и емкости их межэлектродных зазоров (C1 – C3).

Схема замещения ускорительной трубки представлена в виде соединенных параллельно сопротивления R и емкости C.

Расчет значений параметров элементов схемы замещения ускорителя осуществлялся с помощью аналитических формул, за исключением элементов L2, L3, L5, L6 и L7, имитирующих паразитные индуктивности разрядников. Поскольку электроды разрядников имеют сложную форму и малую индуктивность (единицы нГн), которую трудно измерить прибором или напрямую рассчитать, используя аналитические формулы [3, 4], расчет их индуктивностей

проводился в программе для трехмерного моделирования физических процессов [5]. Для этого были построены модели электродов. Модели электродов разрядников представлены на рис. 5, их геометрия полностью повторяет геометрию соответствующих элементов, присутствующих в конструкции субнаносекундного формирователя.

Построение расчетных моделей проводилось для импульсов длительностью в пределах 0,3–3 нс, что соответствует частотам порядка нескольких ГГц. Для таких частот характерно распространение токов в некотором поверхностном слое металлических проводников (скин-слое), толщину которого можно оценить по формуле:

$$\Delta = c \sqrt{2 \frac{\epsilon_0}{\omega \mu_m} \rho}$$

где  $\epsilon_0 = 8,85419 \cdot 10^{-12}$  Ф/м – диэлектрическая постоянная вакуума,  $\rho$  – удельное сопротивление,  $c$  – скорость света (м/с),  $\mu_m$  – относительная магнитная проницаемость,  $\omega = 2 \cdot \pi \cdot f$  – циклическая частота ( $c^{-1}$ ),  $f$  – частота (Гц). Для рассматриваемых случаев толщина скин-слоя находится в диапазоне 0,7–13 мкм.

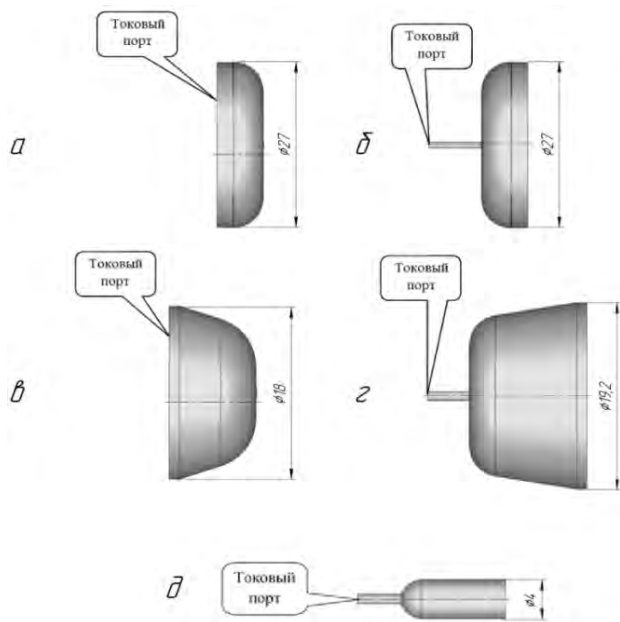


Рис. 5. Модели электродов разрядников: а – модель электрода формирующей линии; б – модель электрода промежуточной линии и канала газового пробоя межэлектродного зазора первого обостряющего разрядника; в – модель электрода короткой накопительной линии; г – модель электрода конического участка передающей линии и канала газового пробоя межэлектродного зазора второго обостряющего разрядника; д – модель канала газового пробоя межэлектродного зазора срезающего разрядника с выдвижным электродом.

Для упрощения расчетов предполагалось, что ток распространяется только в скин-слое, равномерно распределяясь по его сечению. Поэтому модели представляют собой тонкие проводящие оболочки.

При расчетах канал искрового канала моделировался в виде сплошного цилиндрического проводника диаметром 1 мм. Имитация подачи тока осуществлялась при помощи токового порта, подающего постоянный ток величиной 1 А через торцевую поверхность сечения проводников модели.

Полученные значения индуктивностей присваивались соответствующим индуктивным элементам в электрической схеме замещения ускорителя (рис. 4).

### Результаты расчетов амплитудно-временных характеристик субнаносекундного ускорителя электронов

Расчеты импульса напряжения на выходе высоковольтного блока производились с использованием эквивалентной схемы, приведенной на рис. 3. Форма и величина импульса напряжения приведена на рис. 6.

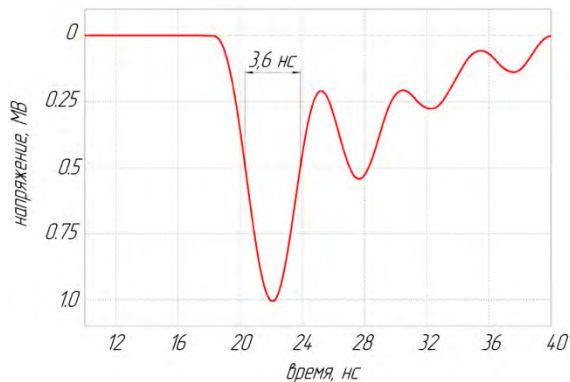


Рис. 6. Расчетный импульс напряжения на выходе высоковольтного блока

Амплитуда импульса составила 1 МВ при длительности на полувысоте 3,6 нс.

На рис. 7 представлен расчетный импульс напряжения зарядки короткой накопительной линии  $L_3$  (обозначение элементов схемы приведено согласно рис. 4) после замыкания ключей  $K_1$  и  $K_2$ . Ключ  $K_1$  замыкался при достижении на нем напряжения 1 МВ, которое соответствует максимальной электропрочности формирующего узла. Ключ  $K_2$  замыкался на максимуме импульса зарядки короткой накопительной линии.

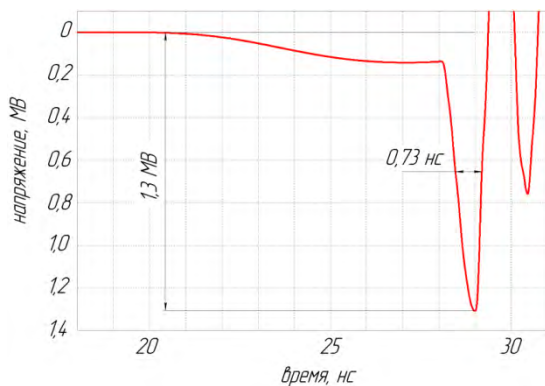


Рис. 7. Расчетный импульс напряжения зарядки короткой накопительной линии

Амплитуда импульса напряжения зарядки короткой накопительной линии составила 1,3 МВ. Из рис. 7 видно, что перед основным импульсом имеется предимпульс, который вызван наличием проходной емкости межэлектродного зазора первого обостряющего разрядника. Длительность предимпульса составила  $\approx 10$  нс, амплитуда –  $\approx 150$  кВ, что значительно меньше амплитуды основного импульса. Наличие предимпульса приводит к снижению разности потенциалов между электродами второго обостряющего разрядника, а следовательно, к увеличению времени коммутации данного разрядника и увеличению длительности субнаносекундного импульса напряжения.

Спустя 0,1 нс после замыкания  $K_2$  замыкался ключ  $K_3$ , при этом формировался импульс напряжения с длительностью на полувысоте менее 0,3 нс, который затем распространялся по передающей линии формирователя. Расчетный импульс напряжения на ускорительной трубке представлен на рис. 8.

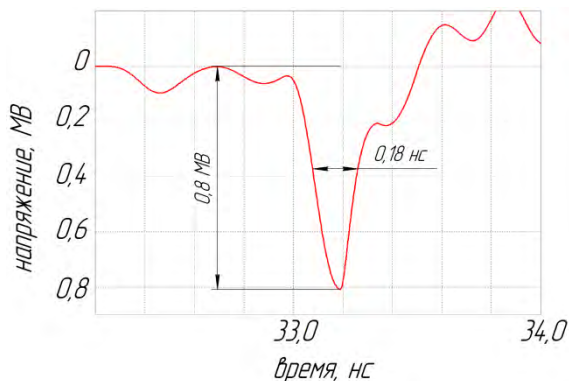


Рис. 8. Расчетный импульс напряжения на ускорительной трубке

Амплитуда импульса напряжения на ускорительной трубке составила 0,8 МВ, длительность импульса на полувысоте равна 0,18 нс.

Согласно результатам расчета при выходном напряжении 1 МВ высоковольтного блока ускорителя АРСА короткая накопительная линия заряжается до напряжения 1,3 МВ, при этом на ускорительной трубке реализуется импульс напряжения с амплитудой более 0,8 МВ и длительностью на полувысоте менее 0,3 нс, что удовлетворяет предъявляемым к ускорителю требованиям.

### Регистрация импульсов напряжения нано- и субнаносекундной длительности

**Напряжение на выходе высоковольтного блока ускорителя.** На рис. 9 представлена схема расположения делителей напряжения в ускорителе.

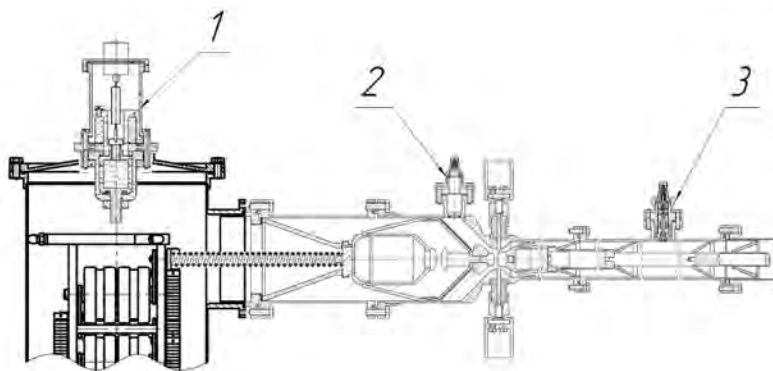


Рис. 9. Расположение делителей напряжения: 1 – двухступенчатый жидкостный делитель напряжения; 2 – наносекундный емкостной делитель напряжения; 3 – субнаносекундный емкостной делитель напряжения

Для регистрации импульса напряжения на выходе высоковольтного блока ускорителя использовался двухступенчатый жидкостный делитель напряжения 1 [6], который подсоединялся параллельно формирователю субнаносекундных импульсов напряжения.

Входное сопротивление делителя подбиралось путем изменения концентрации электролита и было равно 1,2 кОм, что позволило ограничить подсадку напряжения высоковольтного блока на уровне не более 10 % от напряжения холостого хода и при этом обеспечить стабильность коэффициента деления и максимальное временное разрешение делителя.

Форма импульса напряжения на выходе высоковольтного блока ускорителя, зарегистрированная с помощью осциллографа с полосой пропускания 300 МГц, приведена на рис. 10. Для сравнения на рис. 10 приведен расчетный импульс напряжения.

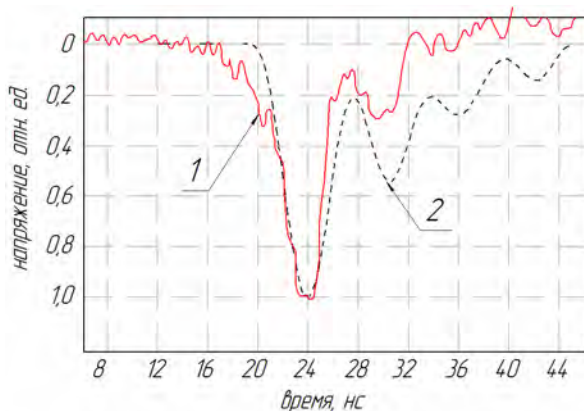


Рис. 10. Форма импульса напряжения на выходе высоковольтного блока ускорителя: 1 – зарегистрированная, 2 – расчетная

Амплитуда зарегистрированного импульса напряжения  $U \approx 800$  кВ, длительность первого пика  $\tau_{0,5} \approx 3,5$  нс. Зарегистрированный импульс напряжения на выходе высоковольтного блока ускорителя близок по форме к импульсу, рассчитанному в программе анализа электронных схем.

**Напряжение зарядки короткой накопительной линии** регистрировалось с помощью наносекундного емкостного делителя (поз. 2 рис. 9). Делитель должен иметь временное разрешение 1–2 нс и обеспечивать герметичность формирователя, заполненного сжатым газом.

Форма импульса напряжения зарядки короткой накопительной линии, зарегистрированная с помощью осциллографа с полосой пропускания 600 МГц, приведена на рис. 11.

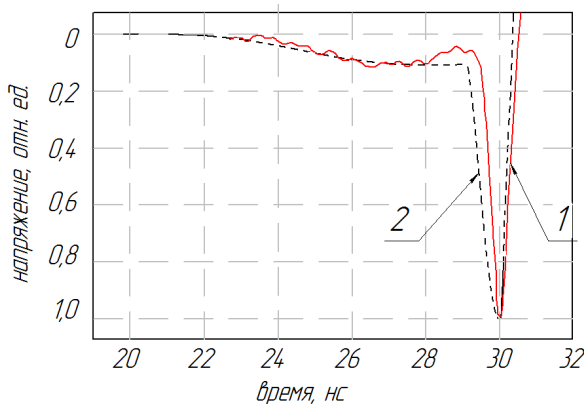


Рис. 11. Форма импульса напряжения зарядки короткой накопительной линии: 1 – зарегистрированная, 2 – расчетная

По данному рисунку можно судить о временных характеристиках импульса напряжения зарядки короткой накопительной линии. Длительность импульса на полувысоте меньше  $\tau_{0,5} < 0,8$  нс. Сравнение зарегистрированного импульса напряжения зарядки короткой накопительной линии с рассчитанным (рис. 7) показывает, что они близки по форме.

### Напряжение на выходе формирователя

Для контроля работоспособности формирователя требуется производить регистрацию падающего на ускорительную трубку и отраженного от нее субнаносекундных импульсов напряжения. Регистрация производилась с помощью субнаносекундного емкостного делителя напряжения (рис. 9), установленного на расстоянии 300 мм от трубки.

Регистрация импульса напряжения с делителя осуществлялась с помощью осциллографа с полосой пропускания 1,5 ГГц. Осциллограмма импульса приведена на рис. 12.

Из рис. 12 видно, что сначала регистрируется падающий на трубку импульс напряжения, затем через время, равное двойному пробегу сигнала от делителя до трубки ~2 нс, регистрируется отраженный от трубки импульс напряжения. Амплитуда импульса напряжения, падающего на трубку, составила 560 кВ, а отраженного – 270 кВ.

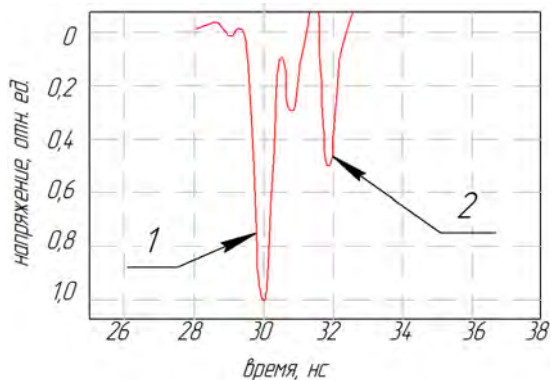


Рис. 12. Осциллограмма импульса напряжения, зарегистрированная на расстоянии 300 мм от ускорительной трубки (развертка – 2 нс на клетку): 1 – падающий импульс напряжения, 2 – отраженный импульс напряжения

Поскольку на ускорительной трубке реализуется импульс напряжения с амплитудой, равной сумме напряжений падающего и отраженного импульсов [7], его амплитуда оказалась выше 800 кВ.

### Заключение

В программе анализа электронных схем проведен расчет амплитудно-временных характеристик импульса напряжения на выходе высоковольтного блока ускорителя АРСА, а также импульсов напряжения зарядки короткой накопительной линии и на ускорительной трубке. Для этого построена эквивалентная схема замещения субнаносекундного ускорителя электронов, учитывающая паразитные электрические параметры элементов конструкции ускорителя. Расчет паразитных индуктивностей элементов срезающих и обостряющих разрядников проводился в программе трехмерного моделирования физических процессов.

Расчеты показали, что при выходном напряжении 1 МВ высоковольтного блока ускорителя АРСА короткая накопительная линия заряжается до напряжения 1,3 МВ, при этом на ускорительной трубке реализуется импульс напряжения с амплитудой более 0,8 МВ и длительностью на полувысоте менее 0,3 нс.

Полученные экспериментальные данные характеристик импульсов напряжения согласуются с результатами расчетов.

### Литература

1. Эльяш С. Л., Александрин А. И., Донской Е. Н., Калиновская Н. И. и др. Ускоритель АРСА – малогабаритный источник импульсов рентгеновского и электронного излучений // Сборник научных трудов ядерных центров России. 1996. № 5 с. 229–237.

2. Юрьев А. Л., Эльяш С. Л., Лойко Т. В., Пухов С. П., Николаев Д. П., Поколев А. Ф., Лашманов С. М. Субнаносекундный ускоритель электронов с газонаполненным формирователем // ВАНТ. Физика радиационного воздействия на радиоэлектронную аппаратуру. 2016. № 3. С. 49–53.

3. Гинкин Г. Г. Справочник по радиотехнике. М.: Государственное энергетическое издательство, 1948. С. 191–220.

4. Калантаров П. Л., Цейтлин А. А. Расчет индуктивностей: Справочная книга. Энергоатомиздат. Ленинградское отделение, 1986.

5. Селезнев А. А., Эльяш С. Л., Юрьев А. Л. Расчет индуктивности элементов сложной формы, используемых в конструкции субнаносекундного ускорителя электронов // Молодежь в науке. Сборник докладов XV научно-технической конференции. Саров. 2016.

6. Лойко Т. В., Эльяш С.Л., Калиновская Н. И. Регистрация импульсов высокого напряжения с субнаносекундным разрешением // Приборы и техника эксперимента. 1981. № 2. С. 98–99.

7. Желтов К. А. Пикосекундные сильноточные ускорители. М.: Энергоатомиздат, 1991. С. 4–113.