

# РЕЗУЛЬТАТЫ РАЗРАБОТКИ И ИССЛЕДОВАНИЙ ИЗОГНУТОЙ ВОДЯНОЙ ПЕРЕДАЮЩЕЙ ЛИНИИ ТИПОВОГО МОДУЛЯ УСТАНОВКИ «ГАММА-4»

С. Ю. Пучагин, К. В. Страбыкин, Д. С. Фарафонов, А. А. Чернопазов

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

## Введение

В настоящее время в ИЯРФ РФЯЦ-ВНИИЭФ проводятся работы по созданию четырехмодульной электрофизической установки «Гамма-4», предназначенной для генерации импульсов тормозного излучения с повышенным содержанием СЖР-компоненты. Типовой модуль установки, представленный на рис. 1, включает в свой состав два первичных накопителя электрической энергии – генератора импульсных напряжений (ГИН), двойную ступенчатую формирующую линию (ДСФЛ) и систему передачи энергии (СПЭ), состоящую из водяной передающей линии (ВПЛ), ускорительной трубки (УТ) с узлом секционированного изолятора и магнитоизолированной передающей линии (МИПЛ), а также высоковольтного вакуумного диода (ВД), в котором энергия электромагнитного импульса преобразуется в импульс тормозного излучения.

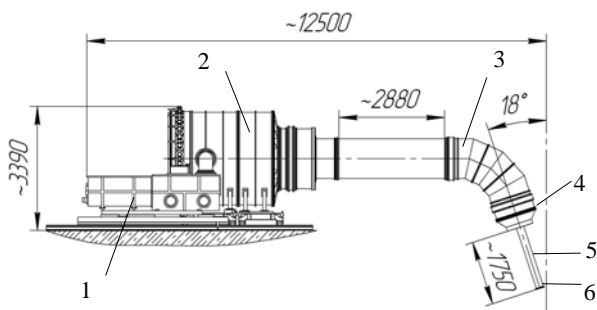


Рис. 1. Конструктивная схема модуля: 1 – ГИН; 2 – ДСФЛ; 3 – ВПЛ; 4 – УТ; 5 – МИПЛ; 6 – ВД

В данной работе представлены результаты исследований ВПЛ из состава СПЭ типового модуля установки «Гамма-4». Конструктивно ВПЛ является изогнутой и авторам данной работы не известны ее аналоги, применяемые в мощной импульсной технике, не только в РФ, но и в лабораториях других стран. Исследование процесса распространения электромагнитной волны в линии подобной геометрии представляет большой практический интерес с точки зрения создания многомодульных установок. Знание закономерностей этого процесса необходимо для правильной оценки надежности работы ВПЛ и эффективности работы как ВПЛ, так и всего модуля в целом.

На первом этапе исследований СПЭ использовалась ВПЛ с минимально возможными геометриче-

скими размерами. Испытания этого варианта ВПЛ показали его неудовлетворительную работу: в изогнутой части ВПЛ происходили электрические пробоев. В качестве предполагаемых причин электрических пробоев были выделены две:

1. Малый зазор между внешним и внутренним электродами линии, вследствие чего электрическая прочность водяного зазора оказалась недостаточной.

2. Распространение электромагнитной волны происходит таким образом, что повышается напряженность электрического поля в водяном зазоре изогнутой линии.

Тот факт, что на прямом участке ВПЛ диаметром 650 мм при входном импульсе с теми же параметрами пробоев не наблюдалось, свидетельствует в пользу второй причины.

Неработоспособность ВПЛ по причине электрических пробоев привела к решению разработать СПЭ с увеличенными геометрическими размерами для устранения пробоев. При этом необходимо было выяснить, будут ли в ней происходить процессы, подобные происходившим в ВПЛ диаметром 650 мм, и как эти процессы будут влиять на надежность и эффективность работы новой ВПЛ.

## Исследование модели изогнутой ВПЛ

Прежде всего необходимо отметить важное свойство изогнутой ВПЛ: процесс распространения электромагнитной волны происходит в трех измерениях. Если в остальных частях типового модуля распространение волны с некоторыми допущениями (синхронность срабатывания разрядников многоканального и предимпульсного коммутаторов модуля) можно считать двумерным процессом, то для изогнутой ВПЛ подобные допущения делать нельзя.

Как уже отмечалось выше, было сделано предположение о том, что в изогнутой ВПЛ при распространении электромагнитного импульса происходит локальное увеличение напряженности электрического поля, что в случае с ВПЛ с внешним диаметром 650 мм приводило к пробоям в водяной изоляции. Распространение электромагнитных волн описывается уравнениями Максвелла, которые можно свести к системе волновых уравнений для скалярного и векторного потенциалов

$$\Delta U - \frac{\varepsilon \mu}{c^2} \frac{\partial^2 U}{\partial t^2} = 0; \quad \Delta \vec{A} - \frac{\varepsilon \mu}{c^2} \frac{\partial^2 \vec{A}}{\partial t^2} = 0.$$

Аналитическое решение этих уравнений для изогнутой ВПЛ затруднительно. Поэтому было произведено численное трехмерное моделирование рассматриваемого узла.

Для проверки нашего предположения была построена модель ВПЛ диаметром 1070 мм, представленная на рис. 2, которая включает прямые и изогнутый участки. Второй отрезок однородной коаксиальной линии, который в данной модели соединен с изогнутым участком ВПЛ вместо ускорительной трубки (см. рис. 1), замкнут накоротко. На рис. 2 стрелками показаны отрезки линий, вдоль которых рассчитывалось значение напряжения. Отрезки 8 и 10 расположены в той же плоскости, что и отрезки 7 и 9, они перпендикулярны последним и плоскости рисунка. В качестве входного импульса для модели выбран выходной импульс ДСФЛ ускорителя «Гамма-1» при его работе с запуском разрядников ДСФЛ на второй полуволне импульса напряжения. Этот импульс, а также импульсы напряжений, рассчитанные вдоль линий 1–10, представлены на рис. 3.

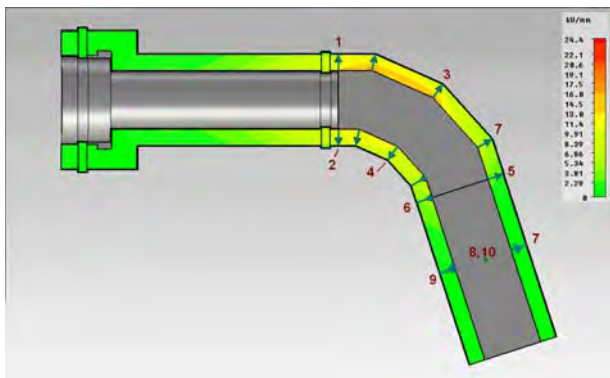


Рис. 2. Модель водяной передающей линии

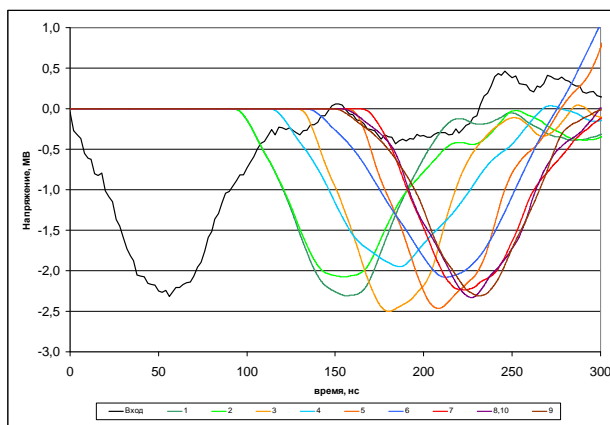


Рис. 3. Напряжения, рассчитанные при распространении электромагнитного импульса в изогнутой части ВПЛ

На графике, представленном на рис. 3, видно, что амплитуда импульса напряжения последовательно изменяется при прохождении мест соединения прямых участков, составляющих изогнутую часть ВПЛ. Напряжение увеличивается на стороне, соответствующей максимальной длине пробега электромагнитной волны, и уменьшается на стороне, где

длина пробега минимальна. При переходе электромагнитной волны из изогнутой части ВПЛ на прямой участок первоначальное симметричное пространственное распределение волны частично восстанавливается. Это видно из кривых 7–10 на рис. 3, которые показывают, что после прохождения прямого участка однородной коаксиальной линии длиной 0,75 м форма импульса напряжения приближается к форме входного импульса, а пространственное распределение близко к осесимметричному, так как формы всех четырех кривых близки и их временной разброс мал.

Таким образом, показано, что увеличение напряжения в изогнутой ВПЛ может быть объяснено особенностями самой изогнутой линии, а не ее взаимодействием с другими элементами СПЭ, в частности, с ускорительной трубкой. Кроме того, при моделировании было обнаружено, что на участке коаксиальной прямой однородной передающей линии достаточной длины происходит выравнивание пространственного распределения электромагнитного импульса, которое на входе линии было неоднородным. В случае жидкого диэлектрика с линейными свойствами это явление можно объяснить только существованием компонент волны, которые распространяются не параллельно оси симметрии линии, а под некоторым углом к ней. Закономерности, связанные с распространением пространственно несимметричного импульса в однородных линиях, выходят за рамки данной работы и авторами не рассматривались.

### Работа изогнутой ВПЛ в составе типового модуля

Выше было показано, что при распространении электромагнитной волны в изогнутой ВПЛ происходит локальное увеличение напряженности электрического поля. Необходимо было выяснить, насколько данный эффект проявится в ВПЛ, входящей в состав типового модуля.

Для исследования работы изогнутой части ВПЛ была построена модель, представленная на рис. 4. Изогнутая часть ВПЛ соединена с ускорительной трубкой (модель трубки рассматривалась в работе [1]), нагруженной на активное сопротивление величиной 2,9 Ом. Конструкция ускорительной трубки здесь упрощена. В частности, секционированный изолятор заменен сплошным диэлектрическим цилиндром, но геометрия трубки при этом была сохранена.

Ускорительная трубка введена в модель в силу ряда причин. Во-первых, она воздействует на бегущую электромагнитную волну, вызывая отраженные волны, которые затем возвращаются в ВПЛ и взаимодействуют с основным импульсом. Если заменить ускорительную трубку объектом с другой конфигурацией, например однородной коаксиальной линией (см. выше), амплитуда отраженной волны и ее пространственное распределение будут отличаться от имеющихся в действительности. Следовательно, результат моделирования (напряжение между электродами ВПЛ

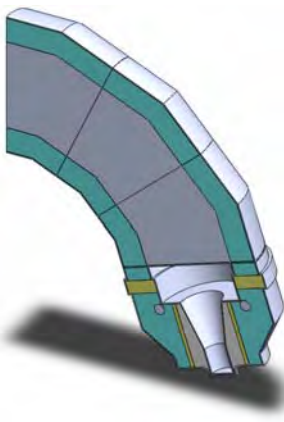


Рис. 4. Модель изогнутой части ВПЛ с ускорительной трубкой

в определенном месте либо распределение электрического поля) будет отличаться от измеренного в эксперименте. Во-вторых, необходимо сопоставить экспериментальные данные с данными, полученными при помощи моделирования.

К настоящему времени произведено несколько включений ускорителя при номинальных параметрах выходного импульса, которые соответствуют зарядному напряжению ГИНов, равному 90 кВ. В этих экспериментах пробоев в изогнутой ВПЛ не наблюдалось.

На рис. 5 представлено расположение отрезков прямых, вдоль которых вычисляются формы импульсов напряжения. Наиболее близко соответствуют датчикам, емкостным делителям, расположенным в изогнутой ВПЛ, отрезки 1, 2, 15 и 16.

При моделировании изогнутой ВПЛ с ускорительной трубкой было получено, что также происходит локальное повышение напряженности электрического поля.

На рис. 6 представлены формы импульсов напряжения, рассчитанные вдоль линий 1, 15 и 16 (импульс

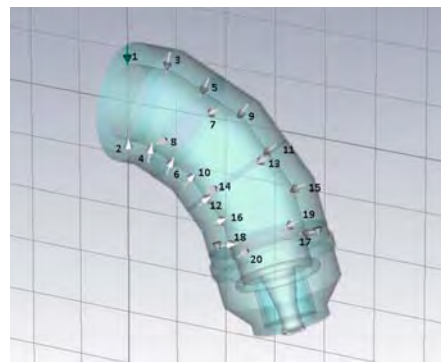


Рис. 5. Расположение датчиков напряжения в модели изогнутой ВПЛ

напряжения, рассчитанный вдоль линии 2 идентичен импульсу напряжения, рассчитанному вдоль линии 1), а также формы импульсов напряжения, измеренные в изогнутой ВПЛ при включении ускорителя «Гамма-1» (рабочий импульс № 481). Из графиков на рис. 6 видно, что формы импульсов напряжения, полученные в эксперименте, согласуются с рассчитанными импульсами с учетом высокочастотных наводок, наложенных на измеренные импульсы. Некоторые различия в форме расчетных импульсов и импульсов, полученных в эксперименте (в частности, это касается второго импульса амплитудой около 1 МВ, наблюдаемого после основного импульса в начале ВПЛ), можно объяснить тем, что импеданс нагрузки, используемой в эксперименте (вакуумный диод) является нелинейным и зависящим от времени, в отличие от постоянного импеданса нагрузки в модели, равного 2,9 Ом.

На рис. 6 приведен также импульс напряжения на нагрузке, амплитуда которого составляет около 2 МВ. Тем не менее, целью работы не является изучение эффективности передачи энергии в нагрузку, и авторами влияние изогнутой ВПЛ на эффективность передачи энергии не исследовалось.

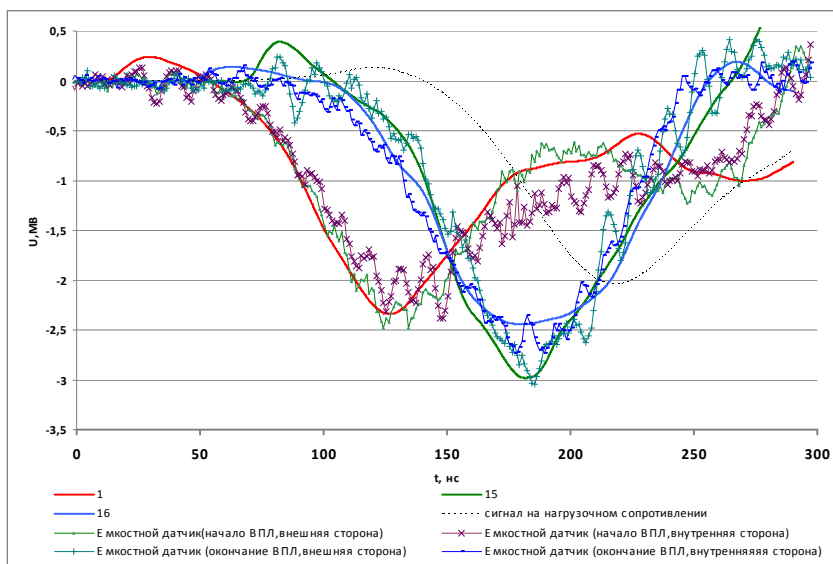


Рис. 6. Результат моделирования изогнутой ВПЛ с ускорительной трубкой и экспериментально полученные напряжения в ВПЛ

## **Заключение**

В работе было получено, что результаты моделирования изогнутой ВПЛ хорошо согласуются с результатами, измеренными в ходе экспериментов на ускорителе «Гамма-1». Так как в расчетах получено увеличение амплитуды напряжения бегущей электромагнитной волны при ее прохождении через изогнутую ВПЛ независимо от того, является ли для нее нагрузкой ускорительная трубка или отрезок прямой ВПЛ, то причиной увеличения амплитуды напряжения следует считать саму форму изогнутой ВПЛ. Этот факт в сочетании со слишком малым зазором между внутренним и внешним электродами в изогнутой ВПЛ с внешним диаметром 650 мм послужил причиной неработоспособности названной

линии. Изогнутая ВПЛ, которая исследовалась в данной работе, имеет межэлектродный зазор, при котором средняя напряженность электрического поля в водяной изоляции не превышает 160 кВ/см, и который, как показывают эксперименты, достаточен для надежной работы СПЭ и ускорителя «Гамма-1» в целом.

## **Литература**

1. Губин Д. С., Фарафонов Д. С. Моделирование ускорительной трубки для импульсного сильноточного ускорителя электронов «Гамма-1». IX научно-техническая конференция «Молодежь в науке». Саратов, 2010.