

ТЕХНИЧЕСКАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ ЧАСТОТНОГО ИМПУЛЬСНОГО ПИТАНИЯ ПО СХЕМЕ БЛЮМЛЯЙНА ВАКУУМНЫХ ФОТОЭЛЕМЕНТОВ ДЛЯ СШП-ГЕНЕРАТОРОВ СВЧ-ИЗЛУЧЕНИЯ

Н. Н. Хавронин, А. А. Зубков, Р. Н. Мунасыпов

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИТФ им. акад. Е. И. Забабахина», г. Снежинск Челябинской обл.

Введение

Для генерации СВЧ-излучения с использованием электронных пучков, генерируемых в фотоэлементах (ФЭК), требуется генератор импульсного напряжения (ГИН) для питания ФЭК. Инициирование электронного пучка в ФЭК осуществляется после достижения на нем заданного напряжения, что с точки зрения электротехники означает зарядку до этого напряжения его межэлектродной емкости внешним генератором импульсного напряжения.

Требования к генератору изложены в ряде технических заданий и, в конечном счете, сводятся к следующим: зарядка за время ~ 2 нс с частотой 1–10 кГц в 1, 10 и 100 каналах емкостей по 10 пФ до напряжения 100 кВ и емкости 40 или 100 пФ – в одном канале до напряжения 200 кВ. Здесь число каналов соответствует количеству параллельно заряжаемых емкостей ФЭК. Длительности импульсов напряжения на ФЭК – 5–20 нс.

Проанализирована возможность реализации приведенных выше требований к генератору импульсных напряжений и рассмотрен ряд конкретных схемных решений ГИН. В результате для зарядки 40 пФ емкостей ФЭК до напряжения 200 кВ в одноканальном варианте выбран генератор на кабельных формирующих линиях, собранный по схеме Блюмляйна. Основным преимуществом этого варианта по сравнению с другими (кабельный генератор по схеме Веденского, генератор на основе формирующей линии с масляной изоляцией) является вдвое меньшее напряжение зарядки формирующих линий при том же самом напряжении на заряжаемой емкости и связанный с этим несколько более высокий КПД. В настоящей работе рассматривается предложение технической реализации такого генератора.

Схема Блюмляйна

В «классическом» варианте генератор по схеме Блюмляйна представляет собой трех- или четырехэлектродное устройство, две емкости между электродами которого медленно заряжаются в параллель, как элементы контура с сосредоточенными параметрами, а при разряде соединяются последовательно и работают как длинные линии, формируя импульс напря-

жения на подключенной к ним нагрузке. Сказанное выше демонстрируется на приведенном ниже рис. 1 со схематическим изображением линии Блюмляйна с тремя коаксиальными цилиндрическими электродами. Источник высокого напряжения (ВН) заряжает емкости между электродами 1–2 и 2–3. По завершении зарядки электрод 2 отключается от источника высокого напряжения и закорачивается на «землю». В длинной линии, образованной проводниками 2–3, формируется волновой процесс, который, распространяясь по этой линии, через нагрузку переходит в длинную линию, образованную проводниками 2–1. При этом индуктивность L на время протекания волновых процессов изолирует проводник 1 от «земли». Импульс напряжения на нагрузке формируется в результате взаимодействия волн напряжения, проходящих из одной линии в другую и отраженных от стыка линий. В случае согласованной нагрузки (сопротивление нагрузки равно сумме волновых сопротивлений длинных линий) и равенства волновых сопротивлений и электрических длин длинных линий амплитуда импульса напряжения на нагрузке равна зарядному напряжению длинных линий, а длительность – двойной электрической длине линий. Так как в формировании импульса напряжения на нагрузке участвуют две длинные (формирующие) линии, то другое название этой схемы – «двойная формирующая линия» (ДФЛ).

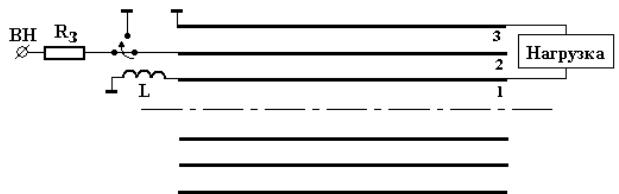


Рис. 1. Схематическое изображение генератора по схеме Блюмляйна

Предлагаемый к реализации кабельный генератор по схеме Блюмляйна отличается от описанного выше тем, что в качестве двух длинных формирующих линий используются два отдельных высоковольтных кабеля, а в качестве нагрузки – передающий кабель с заряжаемой емкостью ФЭК, на которой происходит удвоение амплитуды приходящей к ней волны напряжения. Электрическая схема такого ге-

нератора с зарядной цепью (ВН – R₃) и отсекающим разрядником с согласующим сопротивлением (P_{отс} – R_{отс}) приведена на рис. 2. Указаны также расчетные номиналы элементов схемы, обеспечивающие получение на заряжаемой емкости импульса напряжения с параметрами, близкими к требуемым.

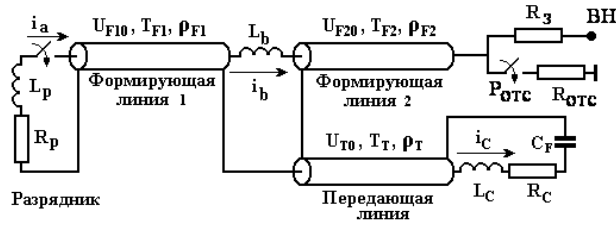


Рис. 2. Генератор на кабельных линиях по схеме Блюмляйна:
 $U_{F10} = U_{F20} = 10^5$ В; $U_{T0} = 0$; $L_b = 5 \cdot 10^{-8}$ Гн; $L_p = 4,5 \cdot 10^{-8}$ Гн; $L_c = 2 \cdot 10^{-8}$ Гн; $T_{F1} = T_{F2} = (5-10) \cdot 10^{-9}$ с; $T_T = 1,5 \cdot 10^{-8}$ с; $\rho_{F1} = \rho_{F2} = 25$ Ом; $\rho_T = 50$ Ом; $R_C = 1,0 \cdot 10^{-2}$ Ом; $C_F = 4,0 \cdot 10^{-11}$ Ф; R_p – расчет по формуле Ромпе – Вайцеля

На рис. 3 приведены результаты расчета импульса напряжения на заряжаемой емкости ФЭК (C_F) при двух значениях электрической длины формирующих кабелей. Для качественного сравнения и в виде иллюстрации работоспособности схемы на этом же рисунке показана осциллограмма экспериментального макетирования на низком напряжении.

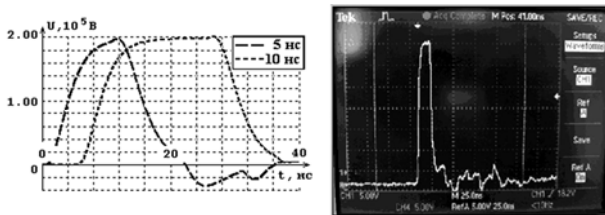


Рис. 3. Расчетные зависимости и экспериментальные осциллограммы напряжения в нагрузке

Конструкция генератора

Далее рассматривается предложение по конкретной технической реализации кабельного генератора Блюмляйна для зарядки емкости ФЭК (40 пФ) до напряжения 200 кВ импульсом длительностью 10 нс.

После удачного макетирования по электротехнической схеме генератора (рис. 2) стало понятно, что основными узлами данного генератора должны быть коммутирующий узел, зарядно-отсекающий узел и тройник с кабельными линиями. Сами по себе узлы являются отдельными блоками и соединяются между собой посредством высоковольтных разъемов. На рис. 4 приведен общий вид генератора.

Рассмотрим конструкцию тройника с кабельными линиями, изображенного на рис. 5. Поскольку в данной схеме величина зарядного напряжения достигает

100 кВ, то формирующие кабельные линии изготовили из высоковольтного кабеля КВИ-120. Передающую кабельную линию необходимо выполнить из кабеля с электрической прочностью, в два раза превышающей зарядное напряжение, таким параметрам удовлетворяет кабель FUG C2121. В тройнике необходимо реализовать надежное электрическое соединение формирующей и передающей кабельных линий без потери их электрической прочности, а также обеспечить внешнюю изоляцию открытых токоведущих частей сборки. Наряду с данными вопросами решалась задача по минимизации индуктивности разделки кабелей. Конечные части передающей и формирующих линий должны иметь разъемные соединения с остальными узлами генератора.

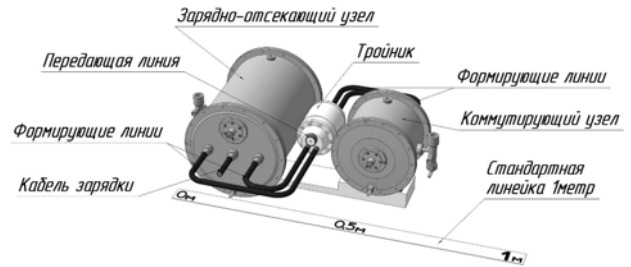


Рис. 4. Общий вид генератора

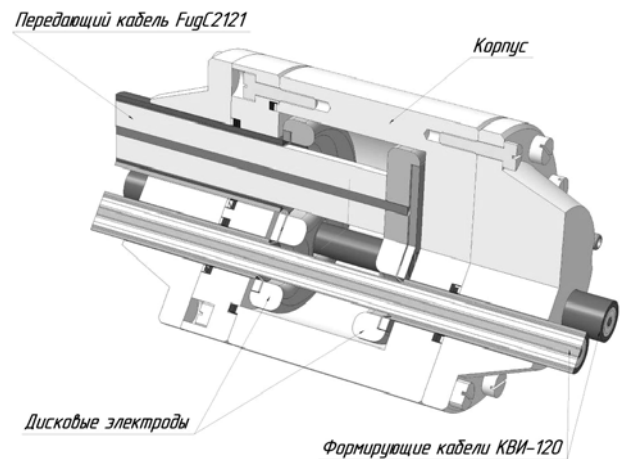


Рис. 5. Общий вид тройника

В ходе решения данных задач была разработана конструкция тройника, представленная на рис. 5. Надежное электрическое соединение обеспечивается винтовым зажатием компонентов кабелей между деталями дисковых электродов, покрытых оловом. Корпус выполняется герметично из диэлектрического материала, что позволяет решить вопросы с внешней изоляцией и минимизацией индуктивности соединений, поскольку объем внутри корпуса заполняется компаундом способом вакуумирования. Конечные части кабельных линий разделяются сообразно приложенным к ним напряжениям и средам, в которых они устанавливаются.

Переходя к конструкции коммутирующего узла, изображенного на рис. 6, сформулируем задачи, ко-

торые предстоит решить в ходе разработки. Основной задачей коммутирующего узла является коммутация заряженной до -100 кВ формирующей линии с помощью лазерного луча, при этом должны обеспечиваться малая индуктивность подсоединений формирующей линии к разряднику, возможность введения лазерного луча в межэлектродный промежуток, регулировка давления в разряднике $0-50$ ати, регулировка межэлектродного зазора $0-5$ мм, контроль формирования импульса.

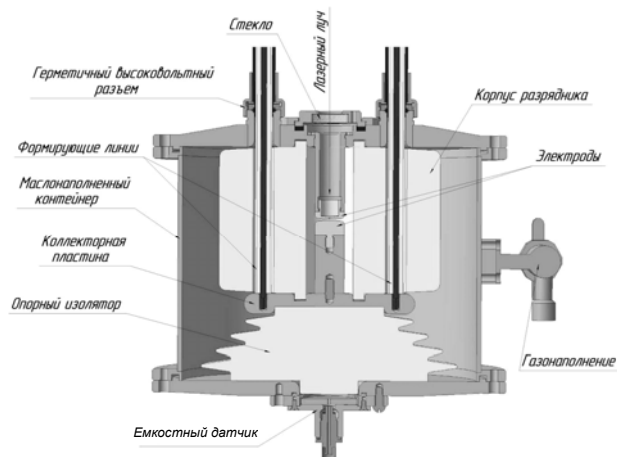


Рис. 6. Общий вид коммутирующего узла

В ходе разработки конструкции было предложено два варианта изоляции узла подключения формирующей линии к разряднику: с маслянонаполненным и газонаполненным контейнерами. Преимуществом газонаполненного контейнера перед маслянонаполненным является возможность применения газов под давлением с более высокими изоляционными свойствами по отношению к масляным средам. Вследствие чего имеет место сокращение размеров самого разрядника и снижение индуктивности подключения, что впоследствии отразится положительно на параметрах выходного импульса. Поскольку данный тип высоковольтных кабелей сложно уплотнить по газу из-за их многослойной структуры, то решено заключить разрядник с системой подключения формирующей линии в маслянонаполненный контейнер. В данный момент разрабатывается конструкция генератора с газонаполненным контейнером.

Конструкция корпуса разрядника была выбрана таким образом, чтобы были удовлетворены требования по прочности на разрыв, а также электропрочности по поверхности в масляной среде. В качестве материала выбран полиамид, он обладает хорошими прочностными и электроизоляционными характеристиками. Также рассматривался вариант изготовления корпуса из поликарбоната.

Опыт работы на предыдущих генераторах с лазерным поджигом показал, что есть необходимость менять стекло, через которое вводится лазерный луч, поэтому в конструкции разрядника предусмотрена смена обоймы со стеклом, а также ее снятие для регулировки

межэлектродного зазора без слива масла из контейнера. В данном случае не требуется полная разборка узла.

Одной из особенностей конструкции коммутирующего узла является то, что усилие, возникающее на фланцах разрядника из-за давления, воспринимает корпус контейнера посредством опорного изолятора, что значительно упрощает конструкцию и делает ее безопасной в плане разрушения под действием высоких давлений.

В одном из фланцев контейнера выполнен оригинальный емкостный датчик для измерения напряжения, изображенный на рис. 7.

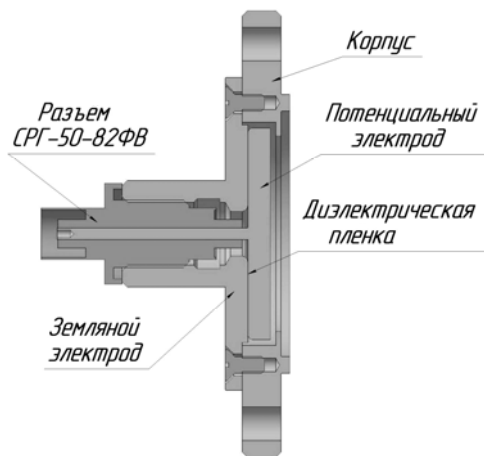


Рис. 7. Общий вид емкостного датчика

Датчик состоит из корпуса, потенциальной и земляной пластин, между которыми находится диэлектрическая пленка. Низковольтным плечом является емкость между потенциальной пластиной и земляной, во время как высоковольтным плечом – емкость между потенциальным электродом и коллекторной пластиной (рис. 6). Датчик собирается и заливается жидким компаундом с последующим отверждением, что повышает его устойчивость к динамическим нагрузкам, токопроводящим частицам, а также обеспечивает постоянство емкости низковольтного плеча.

Разработана оригинальная конструкция высоковольтных вводов формирующих линий в контейнер. Данная конструкция позволяет сохранить электрическую прочность кабелей в месте ввода в контейнер, обеспечить герметичность от протечки масла, сохранив при этом надежный электрический контакт.

В контейнере предусмотрен штуцер для слива масла, отверстие для залива масла, а также кран с манометром для контроля давления газа в разряднике.

Перейдем к рассмотрению конструкции зарядно-отсекающего узла, изображенного на рис. 8. Как и в случае с коммутирующим узлом, было принято решение заключить зарядно-отсекающее устройство в маслянонаполненный контейнер, по причине схожести задач, выполняемых данными узлами и применяемыми в них элементами.

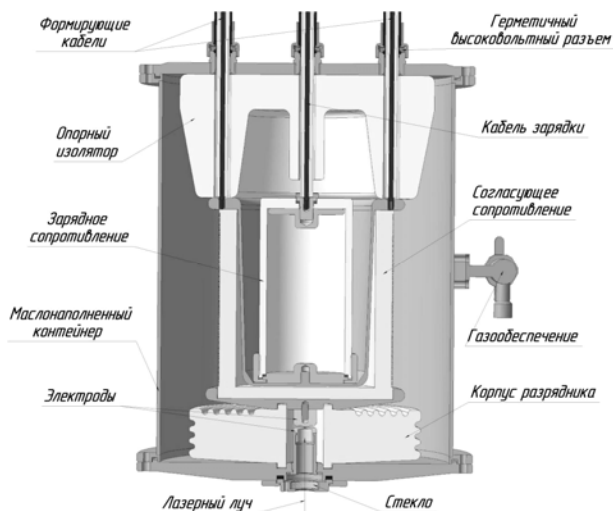


Рис. 8. Общий вид зарядно-отсекающего узла

Специфика зарядно-отсекающего узла заключается в необходимости гашения электромагнитной волны, отразившейся от несогласованной нагрузки. Здесь и возник вопрос подбора согласующего сопротивления. Данное сопротивление должно обладать достаточной мощностью рассеяния энергии отразившейся волны при частотном режиме работы генератора и по величине соответствовать волновому сопротивлению формирующей линии, а также быть достаточно низкоиндуктивным. Проведя анализ энерговыделений на этом резисторе и обзор имеющихся в производстве сопротивлений, пришли к выводу, что таким параметрам будет соответствовать оригинальное сопротивление из нихромовой проволоки диаметром 0,8 мм, намотанной бифилярно на изоляторе (рис. 9). Данная конструкция резистора является достаточно низкоиндуктивной и позволит достаточно хорошо согласовать конец формирующей линии. Также трансформаторное масло, служащее диэлектриком в контейнере, будет частично отводить тепло от резистора к поверхности контейнера, что предотвратит его перегрев.

Поскольку разрядники в обоих узлах выполняют по сути одну и ту же функцию, то конструкцию разрядника для отсекающего узла с некоторыми изменениями формы и размеров заимствовали из коммутирующего узла. Также не изменилась и концепция восприятия корпусом контейнера усилий, создаваемых давлением в разряднике.

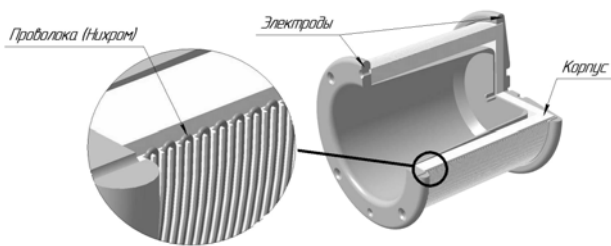


Рис. 9. Общий вид согласующего сопротивления

Следующий вопрос, который необходимо было решить, это исключение влияния зарядного кабеля на процесс формирования импульса в нагрузке, поскольку зарядный кабель, по сути, тоже является отрезком формирующей линии. Также существует необходимость защиты зарядного устройства от перегрузки ввиду неправильного режима работы генератора либо возникновения аварийной ситуации. Решением этих вопросов стало включение в зарядной цепи резистора R_3 (рис. 2). Из соображений по энерговыделению в данном резисторе наиболее подходящим является жидкостный тип сопротивлений. Конструкция представляет собой диэлектрический корпус, закрытый герметично двумя электродами. В качестве рабочей жидкости применяется раствор соли в дистиллированной воде. Варьируя размерами таких резисторов, можно удовлетворить достаточно широкому спектру условий. В нашем случае была выбрана компоновка зарядно-отсекающего узла таким образом, что размеры зарядного сопротивления не повлияли на увеличение габаритных размеров узла.

Заключение

В итоге проделанной работы по предложенной схеме изготовлен макет генератора, проведены макетные исследования, подтверждающие работоспособность схемы Блюмляйна на кабельных линиях, а также разработан ряд технических решений по реализации основных узлов генератора, которые, мы надеемся, позволят достичь высоких, близких к расчетным, электрических и эксплуатационных параметров.