

УДК 621.373

Экранированный генератор импульсного напряжения 800 кВ и энергии 32 кДж

**А. И. Герасимов, В. С. Гордеев,
В. В. Кульгавчук, Г. А. Мысков,
С. Т. Назаренко, В. С. Павлов,
О. Н. Софронова, М. Ю. Суворов,
С. Ю. Шейнов**

Описан ГИН Аркадьева – Маркса. ГИН заряжает до 700 кВ за < 1 мкс водоизолированную формирующую линию ускорителя электронов СТРАУС-Р. В каждом из восьми каскадов ГИН установлено по два конденсатора ИЭПМ-100-0,4. Коммутаторы в первых трех каскадах – наполненные до 0,7 МПа 40 % SF₆ + 60 % N₂ тригатроны на 100 кВ, в остальных – двухэлектродные разрядники. Время задержки срабатывания ГИН 108 ± 5 нс при запасе электропрочности разрядников ~80 %. Индуктивность контура ГИН ~1,4 мкГн. Габариты стального бака ГИН – 2400 × 800 × 800 мм (без выводного устройства), масса ГИН 1700 кг.

Для мощного ускорителя электронов СТРАУС-Р (3,5 МэВ, 60 кА, 60 нс) [1], служащего источником тормозного излучения в режиме фокусировки пучка в пятно $\varnothing \leq 4$ мм (доза за импульс 0,27 Гр (Si) на расстоянии 1 м от выходного фланца), понадобилось синхронизируемое с высокой точностью устройство для зарядки до 700 кВ за время < 1 мкс водоизолированной двойной со ступенчатым изменением волнового сопротивления формирующей линии (ДСФЛ) ускорителя. На основе широко применяемой во ВНИИЭФ высоковольтной базы (например, [2, 3]) в разработку такого устройства положено умножение напряжения по методу Аркадьева – Маркса.

Был проведен анализ и отбор наиболее совершенных элементов, выполнены расчеты электрических полей и экспериментальные исследования, отработаны схемно-конструктивные и компоновочные решения отдельно маслоизолированного генератора (ГИН), а также в составе его с ускорителем. В результате создан ГИН на выходное напряжение 800 кВ и запасаемую энергию 32 кДж. Ниже представлены электрическая схема ГИН, устройство элементов зарядно-разрядного контура, конструкция ГИН в целом, результаты испытаний, выходные характеристики и работа совместно с ускорителем.

Одним из основных компонентов ГИН является накопительный конденсатор для каскадов умножения. От его электрических, геометрических и ресурсных характеристик зависят в значительной степени аналогичные показатели и конструкция ГИН. Были проанализированы параметры конденсаторов, выпускаемых серийными заводами и опытными производствами России и Украины с учетом перспектив получения конденсаторов в последующие годы, так как планировалось при удачных решениях ГИН тиражирование его аналогов для других электрофизических

установок. Был выбран конденсатор типа ИЭПМ-100-0,4 УХЛ4 (100 кВ; 0,4 мкФ; ≤ 100 кА; 50 ± 20 нГн; 2 кДж) ОАО СКЗ "КВАР", г. Серпухов. Он имеет пленочную (лавсан) изоляцию с пропиткой экологически чистым фенилксиллилэтаном (ФКЭ), имеющим при 20 °С пробивное напряжение ≥ 70 кВ/(2,5 мм) и относительную диэлектрическую проницаемость 2,53. По сравнению с широко используемым конденсатором ИК-100-0,4 УХЛ4 того же производителя на одинаковые напряжение и емкость выбранный конденсатор имеет меньшую индуктивность и почти в два раза меньший объем (плотность энергии 0,17 Дж/см³). Испытательное постоянное напряжение – 125 кВ, средний ресурс – 10^3 циклов при колебательном разряде с декрементом затухания не менее 1,5.

Другим важным элементом является коммутатор каскадов. От него зависит, в первую очередь, стабильность срабатывания ГИН при заданном числе зарядно-разрядных циклов ($\geq 10^3$). С учетом высоких требований к надежности работы всех узлов ускорителя разброс Δt времени задержки включения ГИН не должен превышать ± 10 нс относительно начала поданного на вход ГИН пускового импульса при запасе электропрочности коммутаторов $K \geq 60$ %. Снижение Δt и одновременное повышение K является сложной задачей, так как это противодействующие факторы. Однако во ВНИИЭФ имелся опыт разработки и длительного применения разрядников на напряжение 100 кВ с наносекундной точностью срабатывания при $K \geq 60$ % (например, [2–4]). Так как временные характеристики ГИН определяются главным образом работой коммутаторов в начальных каскадах, то для первых трех из них был взят за основу надежный триггер из [2]; последующие ключи оказываются сильно перенапряженными и срабатывают точно. Были просчитаны электрические поля в триггерах с учетом предполагаемого размещения их в ГИН, проведены дополнительные электрические испытания и изменения конструкции ряда деталей. Окончательный вид триггера дан на рис. 1.

Корпус 1 изготовлен из капролона. На нем закреплен основной высоковольтный электрод 7 и фланец 3 с другим основным электродом 6. В центральном отверстии этого электрода установлен управляющий электрод 2 с изолятором 4. Большое внимание уделено плотному примыканию металлических электродов к деталям из диэлектриков. Рабочие части электродов 7 и 6, как и электрод 2, изготовлены из порошкового сплава ВНЖ-2-3 (W, Ni 2 %, Fe 3 %). Газ в полость корпуса подается через узел 5. Назначение остальных деталей понятно из рисунка. Все уплотняющие прокладки – из резины. Габаритный диаметр триггера 175 мм, высота 117 мм. Проверочное давление газом на герметичность и прочность 2 МПа. Диапазон рабочего напряжения $U_0 = 60$ –100 кВ. Испытание одиночных триггеров при $U_0 = 80$ –100 кВ, давления $p = 0,7$ –1 МПа смеси SF₆ : N₂ = 4 : 6 и соответственно $K = 70$ –90 %, импульсном токе 150 кА показало $\Delta t \approx \pm 3$ нс в серии $2 \cdot 10^3$ включений при амплитуде напряжения запуска 65 кВ с фронтом ~ 10 нс. Учитывая эти результаты и проведя дополнительные проверки, было решено в четвертом и последующих каскадах использовать подобные разрядники, но без узлов управления.

ГИН содержит восемь каскадов умножения (рис. 2) с двумя параллельно соединенными конденсаторами ИЭПМ в каждом. Триггеры в первых каскадах, наполняемые высокоэлектро-

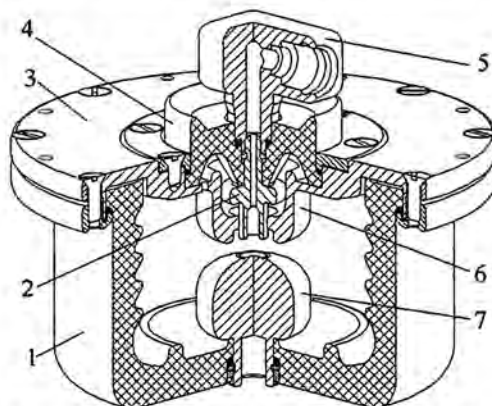


Рис. 1. Триггер каскадов: 1 – корпус; 2 – управляющий электрод; 3 – фланец; 4 – изолятор; 5 – узел ввода газов; 6 – основной электрод с узлом управления; 7 – высоковольтный электрод

отрицательной смесью газов, должны иметь именно указанные полярности потенциалов на электродах для срабатывания с наносекундным разбросом [5]. На их управляющие электроды подается импульс запуска U_y положительной полярности через герметичные высоковольтные электролитические резисторы [6]. Если полярности потенциалов электродов и напряжения запуска противоположны указанному, то при прочих равных условиях задержка и Δt возрастают почти на порядок. В прямой и обратной цепях зарядки конденсаторов каскадов применены однослойные катушки вместо наиболее часто используемых высоковольтных резисторов, что тоже увеличивает надежность работы ГИН.

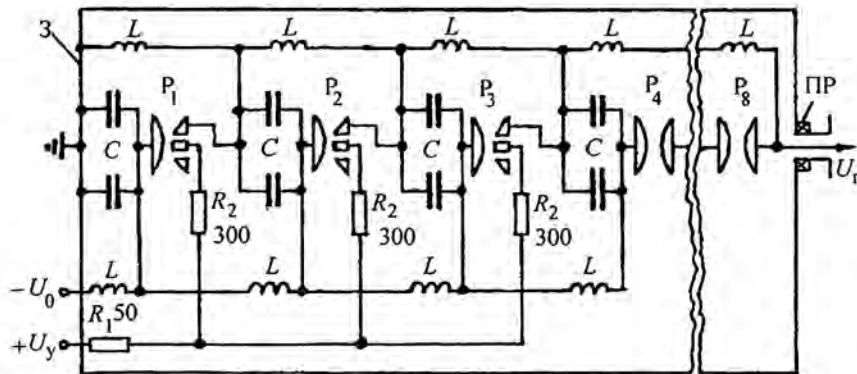


Рис. 2. Электрическая схема ГИН: C – конденсаторы ИЭПМ; P_1 – P_8 – разрядники каскадов; L – катушка индуктивности; R_1, R_2 – резисторы пусковой цепи; $-U_0$ – напряжение зарядки; $+U_y$ – управляющее напряжение; $-U_r$ – выходное напряжение ГИН; ПР – пояс Роговского

При номинальном напряжении зарядки конденсаторов $U_0 = 100$ кВ запасаемая энергия в них 32 кДж и амплитуда выходного напряжения на холостом ходе ~ 800 кВ. Однако для указанного применения ГИН принято рабочее напряжение $U_0 = 90$ кВ с целью повышения надежности и ресурса работы конденсаторов и ускорителя в целом. Ресурс конденсаторов пропорционален E^{10} [7], где E – рабочая напряженность в их изоляции. Значит, снижение E на 10 % увеличит ресурс в 2,2 раза. Зарядка емкости ДСФЛ $C_n = 93$ нФ происходит по известному закону $1 - \cos \omega t$. При емкости ГИН "в ударе" $C_r = 100$ нФ, учете некоторых потерь энергии во время переходного процесса и соотношения емкостей C_r и C_n зарядится последняя до ~ 700 кВ через половину периода T электрических колебаний контура после пробоя всех разрядников в ГИН. Заложенный запас в возможности повышения U_0 в пределах 10 кВ позволял при необходимости корректировать рабочее напряжение или увеличивать энергию ускорения электронов.

При конструировании ГИН особое внимание уделено компоновке каждого каскада и всего ГИН с целью минимизации его индуктивности L_r в сочетании с необходимой электропрочностью. Уменьшение L_r связано с целесообразностью сокращения времени t_3 зарядки C_n для увеличения электропрочности водяных зазоров в ДСФЛ [8]. На рис. 3 показаны разнесенные в пространстве монтажно-сборочные элементы одного каскада. Его основой являются два конденсатора 1. На их выводах последовательно закрепляются и соединяются между собой все изображенные на рисунке элементы и детали. Их устройство и назначение понятно из рисунка и подписи к нему с учетом описания схемы на рис. 2, а также последующих рис. 4 и 5.

Последовательное размещение таких однотипных каскадов в общем металлическом герметичном баке 1 и электрическое соединение их по схеме рис. 2 образует зарядно-разрядную цепь ГИН с использованием бака в качестве обратного токопровода (рис. 4). Каждый каскад содержит

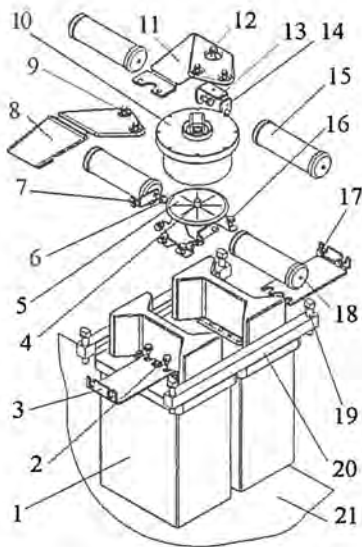


Рис. 3. Типовые монтажно-сборочные элементы одного каскада: 1 – конденсатор (2 шт.); 2, 4, 6, 9, 12, 13, 16, 17 – крепежные болты; 3, 5, 7, 8, 11, 14 – шины; 10 – тригatron; 15, 18 – катушки зарядной цепи; 19 – капролоновый болт; 20 – прижимная планка; 21 – бак

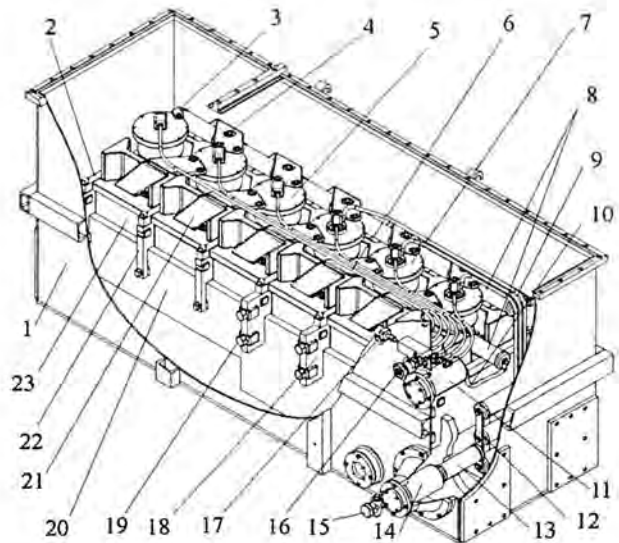


Рис. 4. Вид монтажа восьми каскадов в баке (устройство вывода выходного напряжения и крышка бака не показаны): 1 – бак; 2 – прижимная планка; 3, 4, 12, 21 – шины; 5 – двухэлектродный разрядник; 6 – магистрали газовые; 7 – тригatron; 8 – катушки индуктивности; 9, 10 – отрезки кабелей; 11 – ввод для зарядки конденсаторов; 13 – резистор управляющей цепи; 14 – ввод пускового напряжения; 15 – вентиль для заполнения бака маслом и его слива; 16 – вентиль системы газонаполнения; 17 – датчик давления; 18, 20, 22 – изоляторы; 19 – распорный узел; 23 – конденсатор

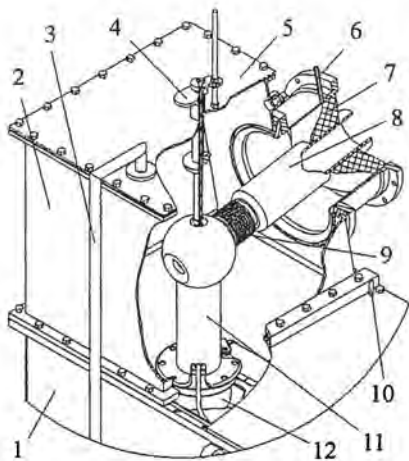


Рис. 5. Узел вывода выходного напряжения ГИН: 1 – бак ГИН; 2 – корпус вывода; 3 – уровнемер масла; 4 – узел закорачивания; 5 – крышка узла вывода; 6 и 10 – штуцеры для выпуска воздуха; 7 – изолятор; 8 – токопровод; 9 – сильфон; 11 – токопровод; 12 – разрядник восьмого каскада

конденсаторы 23 и тригatron 7 или двухэлектродный разрядник 5. Оба конденсатора соединены шиной (не показана), выполненной так, что при ее закреплении на клеммах конденсаторов образуется свободная зона между конденсаторами для размещения катушек 8. Резистор 13 (R_1 на рис. 2) цепи управления расположен в свободной зоне между конденсаторами первого каскада и торцевой стенкой бака. Здесь же на боковой стенке бака закреплены ввод 14 пускового напряжения и высоковольтный ввод 11 для зарядки конденсаторов. Каждый из конденсаторов устанавливается в свою ячейку, образованную изоляторами 18, 20 и 22 из пластин полиметилметакрилата. Консольная продольная пластина 20 обеспечивает необходимый для электропрочности слой масла между дном бака 1 и конденсаторами 23 трех последних каскадов. Фиксация изоляторов в баке осуществ-

вляется распорными узлами 19 тоже из полиметилметакрилата. Конденсаторы фиксируются в ячейке прижимными планками 2. Отрезки кабелей 9 и 10 соединяют вводы соответственно с катушкой 8 и резистором 13. Каскады последовательно соединены шинами 4, 21 и разрядниками. Эти шины одним концом закреплены в предыдущем каскаде на электроде разрядника, соединенном через катушки с баком (L и \mathcal{E} на рис. 2), а другим – на клеммах конденсатора следующего каскада. Присоединение к резистору 13 трех резисторов R_2 (см. рис. 2) выполнено шиной 12. Система газонаполнения разрядников в ГИН включает в себя встроенный в бак коллектор из нержавеющей стали, газовые магистрали 6 из фторопластовой трубки Ф-4Д-Э 7×1, вентиль 16 и датчик давления 17.

Узел вывода выходного напряжения показан на рис. 5. К прямоугольному фланцу бака 1 прикреплен таким же фланцем корпус 2, расположенный над выходным каскадом ГИН (см. рис. 4). Оба фланца при их скреплении болтами обеспечивают одновременно герметичность и надежный электрический контакт по всему периметру. Токопровод 11 вывода установлен на соединенный через катушки с баком электрод разрядника 12 выходного каскада. Полиэтиленовый изолятор 7 разделяет масло в объеме бака ГИН и воду в ДСФЛ. Сильфон 9 служит для выборки допусков на размеры деталей и надежного электрического контактного соединения оголовка проводника 11 посредством отходящего от него токопровода 8 с осевым проводником коаксиала для передачи энергии в ДСФЛ (проводник проходит через отверстие в изоляторе 7). На крышке 5 встроен узел закорачивания 4 вывода, стержневой проводник которого перемещается вручную вниз для соединения оголовка с корпусом в ряде проверочных режимов работы ГИН. В крышке и корпусе вывода выполнены посадочные места (не показаны), где размещены модернизированные гальванически развязанные пояса Роговского [9] и разъемы типа СР-75-166ФВ для измерения параметров импульса разрядного тока. На корпусе установлен также уровнемер 3 масла. Штуцеры 6 и 10 служат для выпуска воздуха из верхней точки бака и из участка коаксиальных проводников при заполнении бака и корпуса вывода маслом. Для температурного изменения объема масла используется свободное пространство в верхней части корпуса вывода.

Характеристики и стабильность параметров резисторов R_1 и R_2 (см. рис. 2) оказывают влияние на задержку и скорость развития пробоя в тригatronах. Эти элементы должны передать на управляющие электроды (УЭ) импульс U_y с минимальными снижением его амплитуды и затягиванием фронта. По этой причине сопротивления резисторов должны быть нулевыми. Однако после развития разряда и замыкания искрой УЭ, электродов 2 и 7 (см. рис. 1) сопротивление, по меньшей мере, R_2 должно быть максимальным для увеличения скорости переполюсовки потенциала всех УЭ и быстрого роста напряжения на них до U_0 для пробоя зазора между УЭ и охватывающим его электродом 6 [10]. Из компромисса этих противоречивых требований экспериментально найдено значение $R_2 \approx 100$ Ом для пробоя указанных промежутков за наименьшее время. Но после срабатывания $P_1 - P_3$ начинают разряжаться через резисторы R_2 конденсаторы C каскадов, причем наибольшее напряжение $\leq 3U_0$ (до 300 кВ) прикладывается к R_2 в третьем каскаде. И хотя R_2 отберут из C в своих каскадах малое количество энергии за время ~ 1 мкс передачи из ГИН энергии потребителю (в связи с большой постоянной времени $R_2C \approx 80$ мкс), однако амплитуда тока через R_2 составит до 3 кА. Применительно к малогабаритным жидкостным резисторам такой ток может оказать влияние на нестабильность их характеристик с ростом числа запусков. Поэтому номиналы R_2 были повышены до 300 Ом, и эксперименты подтвердили общую компромиссную целесообразность этого. Значение $R_1 \approx 50$ Ом выбрано с учетом снижения амплитуды напряжения, передаваемого из ГИН в кабель подачи пускового импульса, и быстрого затухания в нем отраженных от концов кабеля импульсов. Конструкции R_1 и R_2 одинаковы. Их корпуса выполнены из слабо набухающего в масле полиэтилена низкого давления (высокой плотности),

имеют внешний диаметр 52 мм и длину 180 мм. Электроды выполнены из меди МОО, вода для растворения купороса $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ тщательно деионизована и обезгажена. На внешней поверхности концов корпусов имеется резьба, а внутренняя поверхность выполнена конической. Поэтому при продвижении концевых электродов по коническим поверхностям при завертывании по резьбе гаек стыки герметизируются и в корпусе создается избыточное давление жидкости. Резисторы работоспособны в любом положении. Глубина χ скин-слоя в растворе резистора R_1 на частоте $f = 5 \cdot 10^7$ Гц, эквивалентной длительности фронта 10 нс импульса U_y ,

$$\chi = 50,3 \cdot 10^2 \rho^{0,5} f^{-0,5} = 5 \text{ см}, \quad (1)$$

где $\rho = 50$ Ом·см – удельное сопротивление раствора в R_1 . Она в 2,3 раза больше радиуса 22 мм столба раствора и потому можно считать, что плотность тока по поперечному сечению резистора к концу длительности фронта становится почти равномерной. В резисторах R_2 глубина χ больше указанной в 2,45 раза в связи с большим в 6 раз значением ρ . Подробнее о резисторах см. [6].

Каждая катушка L (см. рис. 2–4) намотана стальным проводом $\varnothing 1,2$ мм в пазах глубиной 2 мм на цилиндрическом полиэтиленовом каркасе $\varnothing 45$ мм и содержит 77 витков. К торцам каркаса прикреплены винтами дискообразные электроды. Габаритная длина катушки 178 мм, индуктивность $L = 68$ мкГн (с учетом близко находящихся металлических деталей). После пробоя всех разрядников конденсатор C в каждом каскаде начинает разряжаться через нагрузку на выходе ГИН и одновременно в колебательном режиме через две параллельные индуктивности L (в первом каскаде – через одну L) в прямой и обратной зарядных цепях. Поэтому индуктивность взята такой, чтобы четверть периода T этих колебаний была существенно больше длительности t_3 зарядки C_n . В данном случае $T/4 = \pi/2(LC/2)^{0,5} = 8,2$ мкс. При случайном пробое разрядника в одном каком-либо каскаде запасенная энергия 4 кДж при $U_0 = 100$ кВ может выделиться в основном в активном сопротивлении провода одной катушки, и импульсная температура провода достигнет 120 °С. Это меньше минимальной температуры вспышки 135 °С минерального масла. Однако ситуация с таким нагревом катушки маловероятна, так как практически всегда произойдет с задержкой пробой разрядников в соседних каскадах из-за их перенапряжения и последующее срабатывание всего ГИН с передачей энергии из каскадов в нагрузку. Кроме того, реальная работа при $U_0 = 100$ кВ не предусматривалась.

Бак из углеродистой стали является основным силовым элементом ГИН. Герметичность между крышкой и баком обеспечивается прокладкой из полиуретана марки "Витур". Внутренняя поверхность бака, как и его крышки, покрыта лаком УР-231 для снижения контакта стали с трансформаторным маслом. В днище бака имеется местное углубление, что позволяет при необходимости слить все масло через патрубков с вентилем. Для перемещения ГИН к баку приварены крюки. На наружной поверхности бака имеются пластины с резьбовыми отверстиями для установки в них регулировочных опор под ГИН. Габариты бака $2400 \times 800 \times 800$ мм (без выводного устройства), масса ГИН 1700 кг (рис. 6).

После определения компоновки каскадов ГИН были оценены его электрические параметры. Измерив реальные индуктивности конденсаторов (они оказались близкими для каждого к 65 нГн), рассчитали общую индуктивность ГИН $L'_r \approx 1,5$ мкГн методом суммирования индуктивностей участков его разрядного контура, включая узел вывода напряжения. (Следует отметить, что в связи с особыми требованиями к компоновке выводного узла он выполнен не коаксиальным минимальной длины, а частично в прямоугольном корпусе большого размера и имеет значительную общую длину. Расчетная индуктивность токоподвода от разрядника в последнем каскаде до ДСФЛ $\sim 0,17$ мкГн, а от этого же разрядника через закоротку на корпус $\sim 0,19$ мкГн.) Характери-

стическое сопротивление только контура ГИН $Z' = (L'_r/C_r)^{0,5} \approx 3,9$ Ом. Важным параметром является общее активное сопротивление R'_r контура, определяемое тангенсом угла потерь $\text{tg } \delta$ в ди-



Рис. 6. ГИН без крышки бака. На выходном конце бака установлено выводящее устройство

электрике конденсаторов, активным сопротивлением разрядных каналов в коммутаторах, сопротивлением контактных соединений и всех токопроводящих шин. Связанное с $\text{tg } \delta$ сопротивление

$$R'_\delta = \text{tg } \delta (L'_r C_r)^{0,5} / C_r. \quad (2)$$

Для лавсана $\text{tg } \delta = 0,02$ при $f = 1$ МГц, для ФКЭ – $\text{tg } \delta \leq 0,15$ при 90°C . Но так как средняя толщина слоя этой жидкости между лавсановой пленкой и алюминиевой фольгой не известна, то приняли, что пакеты в конденсаторах плотно сжаты и изоляцией служит только лавсан. Тогда при закороченном выходе ГИН $R'_\delta \approx 0,08$ Ом. Однако из-за большого значения $\text{tg } \delta$ для ФКЭ даже тонкий слой жидкости на лавсане даст увеличение R'_δ . Сопротивление разрядных каналов оценено по формуле Брагинского – Андреева [11]

$$R'_p \approx 0,11 \rho^{1/3} (I^{2/3} t)^{-1}, \quad (3)$$

где l – длина разрядного промежутка (м); ρ – плотность наполняющего разрядник газа (г/см^3); I – средний ток (А) в течение расчетного интервала времени t (с). Подстановка в эту формулу числовых значений при закороченном выходном узле и $U_0 = 80$ кВ в момент $t = T' = 2,43 \cdot 10^{-6}$ с (T' – период колебаний), давлении $p = 0,7$ МПа и указанной выше

смеси газов во всех разрядниках дает сопротивление $R'_p \approx 0,4$ Ом. Сопротивление всех проводников, расположенных по длине $\sim 2,5$ м контура ГИН (электроды разрядников, выводы конденсаторов, соединительные шины и токопроводы), и 45 контактных силовоточных соединений между ними оценено как сопротивление шины такой же длины и шириной ~ 100 мм из Al. С учетом прохождения тока по толщине, равной глубине скин-слоя $\chi = 0,13$ мм на частоте $f = 1/T' = 412$ кГц, это $R'_{\text{ш}} \approx 0,006$ Ом. Таким образом, общее расчетное активное сопротивление $R'_r \sim 0,5$ Ом.

При зарядке ДСФЛ от ГИН общая емкость в контуре $C_k = C_r C_l / (C_r + C_l) = 48$ нФ и потому частота колебаний контура вырастет в 1,45 раза. Поэтому увеличатся во столько же раз вычисленные Z' , R'_δ , $R'_{\text{ш}}$, а R'_r – в 1,85 раза.

Первоначальные испытания ГИН заключались в измерении реальных L_r и R_r при закороченном выходе ГИН и сравнении их с расчетными параметрами. Знание L_r и R_r позволяет найти реальное сопротивление Z^* только ГИН, Z при зарядке им ДСФЛ, а также другие параметры.

Для экспериментов закорачивали выход ГИН, соединяя оголовок токопровода 11 (см. рис. 5) с корпусом бака передвижным стержневым проводником узла 4. Так как $Z' \approx 3,9$ Ом, то паспортное значение разрядного тока 200 кА с двух параллельно соединенных в каждом каскаде конденсаторов не будет превышено, пока U_0 не достигнет 97 кВ. Поэтому сначала конденсаторы заряжали до $U_0 = 70$ кВ (расчетная амплитуда первой полуволны тока ≤ 140 кА) с последующим повышением U_0 до 90 кВ. Импульс управляющего напряжения $U_y = 65$ кВ с фронтом 10 нс от ге-

нератора БИНГ-4 [12] подавали по общему кабелю на УЭ тригатронов. Регистрировали осциллографом форму затухающих колебаний разрядного тока с индукционного датчика в выводном узле. По измеренной длительности периода колебаний $T = 2,35$ мкс и известной C_T получена $L_T = 1,4$ мкГн, близкая к расчетному значению. По декременту затухания колебаний за 2 первых периода, равному 1,8, определено среднее сопротивление контура $R_T \approx 0,7$ Ом, что по порядку величины тоже близко к расчетному. Сопротивление контура ГИН $Z^* = (L_T/C_T)^{0,5} \approx 3,7$ Ом.

Для измерения электропрочностных и пусковых характеристик к выходу ГИН подключали мощный резистор с сопротивлением 3,5 Ом на основе водного раствора сульфата меди. Резистор имел полый цилиндрический полиэтиленовый корпус с герметично закрепленными по его торцам медными электродами, пространство между которыми заполнено раствором. Для установки резистора демонтировали изолятор 7 и токопровод 8, резистор закрепляли на место внутреннего проводника коаксиала. Высоковольтный электрод резистора подсоединяли к сильфону 9, а низковольтный – к выходному фланцу коаксиала. На пусковом кабеле при входе его в ГИН был установлен емкостный делитель напряжения. Ток через резистор измеряли поясом Роговского. Сигналы с делителя и пояса синхронно регистрировали цифровым осциллографом Tektronix-3032. Общее время последовательного пробоя восьми разрядников в каскадах, т. е. время задержки t_r и его разброс Δt_r , определяли по положению начала сигнала токового импульса с пояса по отношению к началу импульса запуска. Измеренное среднее из 10 последовательных включений ГИН время t_r в зависимости от напряжения $U_0 = 70, 80$ и 90 кВ и давления p газовой смеси 40 % SF₆ + 60 % N₂ в разрядниках приведено на рис. 7. При $U_0 = 80$ кВ и изменении p от 0,5 до 0,7 МПа разброс Δt_r не превысил ± 10 нс. При оптимальном давлении $p = 0,7$ МПа и проектном рабочем напряжении 90 кВ (запас $K = 80$ %) получена задержка $t_r = 108$ нс с разбросом $\Delta t_r = \pm 5$ нс. ГИН срабатывал и при $K \leq 120$ %, но с большими t_r и Δt_r . Одиночные запуски ГИН проведены и при напряжениях $U_0 = 95$ и 100 кВ без отрицательных последствий для ГИН.

Затем ГИН длительно работал в составе ускорителя СТРАУС-Р, когда главным образом проверяли и осваивали необходимые режимы получения и фокусировки пучка ускоренных электронов, генерирования тормозного излучения. Следует отметить, что из-за последовательного соединения емкостей C_T и C_L период колебаний уменьшился до $T \approx 1,63$ мкс. Поэтому коммутаторы в ДСФЛ запускали через 770 нс после начала ее зарядки, т. е. за ~ 40 нс до достижения амплитуды напряжения. При изменении U_0 от 75 до 90 кВ в течение полутора лет проведено около 160 включений ГИН без каких-либо нарушений его работоспособности. Результаты экспериментальных исследований ускорителя и его характеристики приведены в [1].

Полученный опыт позволил оперативно провести испытание и отработку режимов функционирования второго экземпляра такого же ускорителя с аналогичным ГИН, сделав около 80 совместных включений, и ввести этот СТРАУС-Р в эксплуатацию.

Оба ГИН показали надежную работу и явились прототипами для создания ГИН на выходное

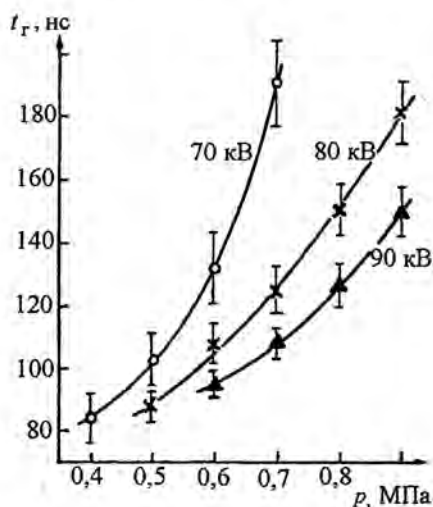


Рис. 7. Зависимость времени t_r задержки срабатывания ГИН от давления p в разрядниках и зарядного напряжения 70, 80 и 90 кВ

напряжение 1 МВ применительно к зарядке ДСФЛ в индукторах многомодульной установки ГАММА [13] и 600 кВ – в индукторах ускорителей СТРАУС-2 [14] и ЛИУ-Р [15].

Список литературы

1. Gordeev V. S., Myskov G. A., Basmanov V. F. et al. Pulsed electron accelerator STRAUS-R // 15th Internat. Conf. on High-Power Particle Beams, BEAMS 2004. S.-Petersburg, Russia, July 18–23 2004. S.-Petersburg: The Efremov Scie. Research Inst. of Electrophysical Apparatus, 2005. P. 323–326.
2. Босамыкин В. С., Герасимов А. И., Павловский А. И. и др. Система из 72 синхронизированных генераторов Аркадьева – Маркса для зарядки до 500 кВ радиальных линий линейного индукционного ускорителя ЛИУ-30 // ПТЭ. 1997. № 2. С. 5–9.
3. Герасимов А. И., Федоткин А. С., Зенков Д. И., Назаренко С. Т. Надежный экранированный генератор Аркадьева – Маркса на 500 кВ и 6,25 кДж со стабильным временем задержки срабатывания // Там же. 1998. № 1. С. 96–101.
4. Герасимов А. И., Федоткин А. С. Надежный газонаполненный тригatron на 100 кВ и коммутируемую энергию до 10 кДж // Там же. 1997. № 2. С. 58–63.
5. Герасимов А. И., Федоткин А. С. Генераторы Аркадьева – Маркса с улучшенной синхронизацией при высоких запасах электропрочности разрядников // Там же. 1991. № 1. С. 146–150.
6. Герасимов А. И., Федоткин А. С., Кульгавчук В. В. Малогабаритные высоковольтные жидкостные резисторы // Там же. 1994. № 2. С. 78–83.
7. Ренне В. Т., Багaley Ю. В., Фридберг И. Д. Расчет и конструирование конденсаторов. Киев: Техника, 1966.
8. Martin G. C. Nanosecond Pulse Techniques. Report SSWA/ G.C.M./ 704/ 49, Apr. 1970.
9. Герасимов А. И. Широкодиапазонные индукционные датчики с наносекундным нарастанием для измерения параметров сильноточных импульсов (обзор) // ПТЭ. 2002. № 2. С. 5–20.
10. Герасимов А. И. Многоканальные разрядники с ламельными управляющими электродами, их развитие и применение (обзор) // Там же. 2004. № 1. С. 5–38.
11. Андреев С. И., Орлов Б. И. К теории искрового разряда // ЖТФ. 1965. Т. 35, № 8. С. 1411–1418.
12. Kudasov B. G., Pavlov S. S., Tananakin V. A. et al. Module pulse nanosecond generators (BING) for universal high-voltage synchronization systems // 11th IEEE Internat. Pulsed Power Conf. Baltimore, Maryland, June 29–July 2, 1997. Springfield, VA: NTIS. 1997. Vol. 2. P. 1572–1574.
13. Avdeeva A. V., Basmanov V. F., Gordeev V. S. et al. Marx generator GIN-1000 with 1 MV output voltage and 80 kJ energy store // 15th Internat. Conf. on High-Power Particle Beams, BEAMS 2004. S.-Petersburg, Russia, July 18–23 2004. S.-Petersburg: The Efremov Scie. Research Inst. of Electrophysical Apparatus. 2005. P. 327–329.
14. Gordeev V. S., Basmanov V. F., Myskov G. A. et al. High-current pulse electron accelerators based on stepped forming lines // ВАНТ. Сер. Ядерно-физические исследования. 2001. Вып. 3. С. 50–52.
15. Пунин В. Т. Комплексы РФЯЦ-ВНИИЭФ на базе мощных линейных ускорителей электронов и импульсных ядерных реакторов // Вооружение. Политика. Конверсия. 2003. № 1 (43). С. 13–17.

A Shielded 800-kV Pulse Generator at an Energy of 32 kJ

A. I. Gerasimov, V. S. Gordeev, V. V. Kulgavchuk, G. A. Myskov,
S. T. Nazarenko, V. S. Pavlov, O. N. Sofronova, M. Yu. Suvorov,
S. Yu. Shejnov

The oil-insulated Marx generator (PVG) is described. The PVG charges a water-insulated forming line of the STRAUS-R accelerator of electrons to 700 kV within a time of $< 1 \mu\text{s}$. Two IEPM-100-0,4 UKhL4 capacitors are installed in each of its eight stages. The switches of the three first stages are 100-kV trigatrons filled with a 40 % SF_6 + 40 % N_2 gaseous mixture to a pressure of 0.7 MPa. The switches of the other stages are two-electrode spark gap. The PVG-operation delay time is $108 \pm 5 \text{ ns}$ at a breakdown-strength margin of each spark gap ~ 80 %. The PVG-circuit inductance is $\sim 1.4 \mu\text{H}$. The overall dimensions of the PVG steel tank are $2400 \times 800 \times 800 \text{ mm}$ (without an output device); the PVG mass is 1700 kg.