

Вакуумный стенд для проведения высоковольтных испытаний камер хранения ЭДМ-спектрометра

© М.С. Ласаков, А.О. Полюшкин, А.П. Серебров, Э.А. Коломенский, А.Н. Пирожков, И.А. Краснощекова

Петербургский институт ядерной физики им. Б.П. Константинова, Национальный исследовательский центр „Курчатовский институт“,
188300 Гатчина, Ленинградская область, Россия
email: serebrov@rpi.spb.ru

(Поступило в Редакцию 9 июля 2015 г.)

Описана конструкция высоковольтного стенда для проверки отдельных изоляторов и их сборок с раздельным контролем токов утечки по каждому изолятору. Главным назначением стенда является подготовка высоковольтной части спектрометра для поиска электрического дипольного момента (ЭДМ) нейтрона. Основой стенда является высоковольтный источник с управляемой полярностью и величиной напряжения до 200 кВ с комплексным контролем параметров. Аналогичный преобразователь используется в эксперименте по измерению ЭДМ нейтрона. Приведены результаты проверки новой конструкции камер хранения ЭДМ-спектрометра при работе с высоким напряжением и проверены предельные возможности преобразователя в условиях аналогичных рабочих, проведены его оптимизация и калибровка.

В эксперименте по поиску электрического дипольного момента (ЭДМ) нейтрона величина напряженности электрического поля в камерах хранения ультрахолодных нейтронов (УХН) входит линейно в определение чувствительности экспериментальной установки [1]. Кроме того, большое значение имеет минимизация токов утечки по камерам хранения УХН, поскольку данные токи могут вызвать неоднородные изменения магнитного поля внутри ЭДМ-спектрометра, способные дать ложный эффект в измерении ЭДМ нейтрона. Для решения этих задач создана лабораторная установка — высоковольтный стенд, общий вид которого показан на рис. 1. Требования к данной установке определялись тем, что подготовка камер хранения УХН включает в себя исследовательскую задачу по высоковольтным испытаниям различных типов изоляторов и вариантов обработки их поверхностей. Наиболее важной является проверка кольцевых камер хранения после нанесения на них специального покрытия (с большой граничной скоростью отражения УХН) и отжига при высокой температуре, а также возможность проверки камер хранения ЭДМ спектрометра в наиболее полной сборке, со всеми частями и подводными коммуникациями, которые используются в эксперименте с УХН.

В составе высоковольтного стенда можно выделить следующие основные части:

— вакуумная камера цилиндрической формы (диаметр 1.8 м, длина 3 м) с отъезжающей по рельсам загрузочной платформой и имеющая три окна, которые позволяют визуально контролировать место и характер высоковольтных пробоев. Вакуумная камера имеет систему откачки, состоящую из форвакуумного, турбомолекулярного и криогенного насосов, которая позволяет за 4 h откачать вакуумную камеру до $2 \cdot 10^{-5}$ Torr,

— высоковольтный ввод для подачи высокого напряжения в вакуумную камеру, представляющий собой кварцевый изолятор, аналогичный тому, что используется в экспериментальной установке по измерению ЭДМ.

Под углом 90° к нему входит один из концов гибкого высоковольтного кабеля, соединенного с высоковольтным источником. Для исключения электрических пробоев и значительных токов утечек по воздушным зазорам кварцевого ввода камера высоковольтного ввода после откачки заполняется электроизолирующим газом SF₆ (элегаз), избыточное давление которого подбиралось экспериментально и составило 5 ат. Высоковольтный ввод испытывался без нагрузки до уровня напряжения ± 180 кВ, при котором ток утечки не превышает 15 нА,

— высоковольтный источник питания и система управления высоким напряжением на базе персонального компьютера.

Рабочий стол закреплен на подвижной крышке вакуумной камеры, которая при открывании движется по рельсам в помещении, а сам рабочий стол при этом движется по рельсам внутри камеры. Таким образом, к рабочему столу открывается свободный доступ, что поз-



Рис. 1. Общий вид высоковольтного стенда.

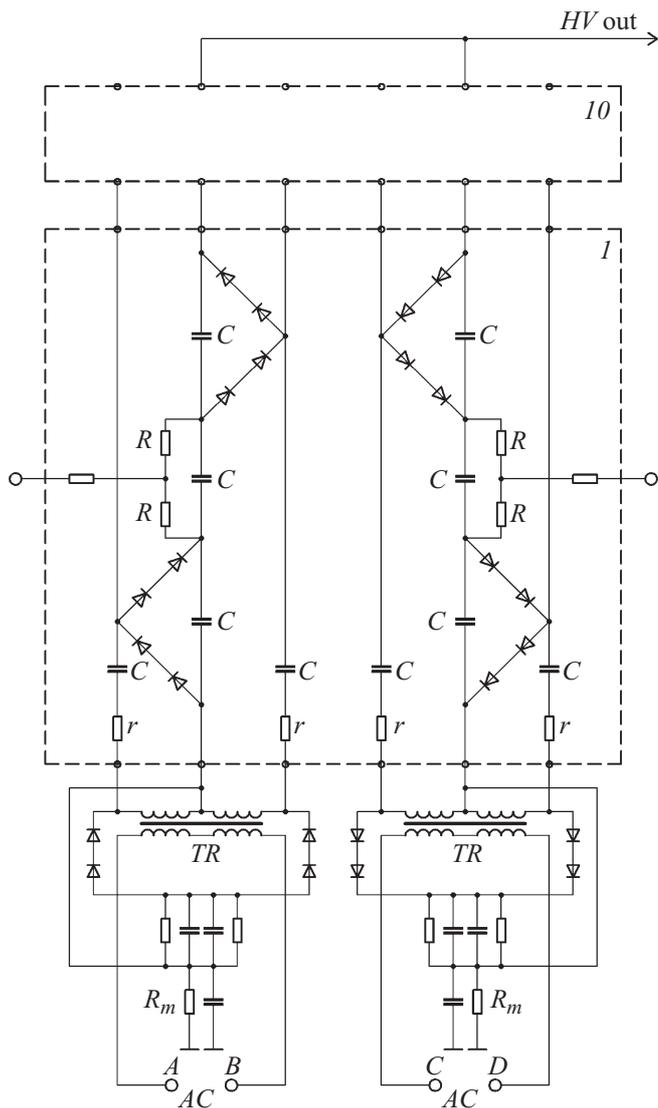


Рис. 2. Принципиальная схема высоковольтного преобразователя.

воляет точно и аккуратно собирать хрупкие изоляторы камер хранения и тяжелые электроды.

Для получения электрического поля требуемой напряженности в стенде использован биполярный высоковольтный источник [2,3] с выходным напряжением до ± 200 kV и управлением полярностью в низковольтной части. Источник соединен с вакуумной камерой стенда высоковольтным кабелем с полиэтиленовой изоляцией, у которого роль центральной жилы выполняет дистиллированная вода, заполняющая центральный канал. Высоковольтный источник состоит из высоковольтного преобразователя с трансформаторами и специализированного интерфейса, обеспечивающего коммутацию полярности высокого напряжения на выходе высоковольтного источника без отключения цепи нагрузки. Высоковольтный преобразователь (рис. 2) представляют собой два разнополярных десятиступенчатых каскадных

генератора с резистивно-емкостной связью, соединенных выходами с общим выводом для подключения нагрузки.

В качестве источника высокого напряжения работает только один каскадный генератор в зависимости от того, на какой из трансформаторов подано питающее напряжение. Другой каскадный генератор, при этом является делителем напряжения на включенных последовательно с диодами сопротивлениях R и измерительными резисторами R_m и используется для измерения выходного напряжения источника. Резисторы r являются ограничительными для пусковых токов при заряде конденсаторов. Каждая ступень каскадного генератора состоит из двух секций умножения, работающих на общие для них последовательно соединенные накопительные конденсаторы. Питание каскадных генераторов осуществляется от двухсекционных высокочастотных повышающих трансформаторов TR . Диоды, подключенные к высоковольтным выводам вторичных обмоток трансформаторов, выполняют защитную функцию от напряжений отрицательной/положительной полярностей, возникающих при возможных пробоях в высоковольтных цепях преобразователя. Каскадные генераторы и высоковольтные трансформаторы расположены в герметичном сосуде из нержавеющей стали, заполненном элегазом под избыточным давлением 2.5 ат.

Специализированный интерфейс [4,5] каскадного генератора напряжения относится к низковольтной части источника и предназначен для обеспечения контроля и низковольтного энергоснабжения (рис. 3) каскадных генераторов и допускает ручное или программное управление.

К интерфейсу подключается лабораторный программируемый источник питания постоянного напряжения типа SM 400-AR-4 (Delta Elektronika), необходимый для энергоснабжения высоковольтных трансформаторов каскадных генераторов, включенных последовательно с транзисторными ключами, расположенными в интерфейсе и образующими два квазирезонансных импульсных источника питания, работающих каждый на свой каскадный генератор. Квазирезонансная технология, использованная при разработке высоковольтного преобразователя, характеризуется устойчивостью к перегрузкам по току и практическим отсутствием в выходном напряжении

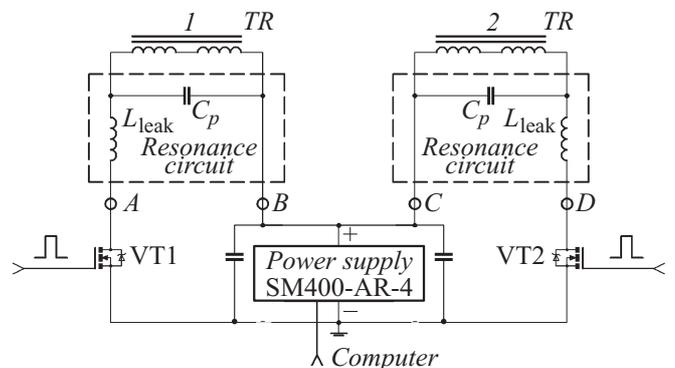


Рис. 3. Принципиальная схема низковольтного энергоснабжения, где VT1, VT2 — MOSFET-транзисторы, L_{leak} , C_p — виртуальные элементы последовательного резонансного контура.

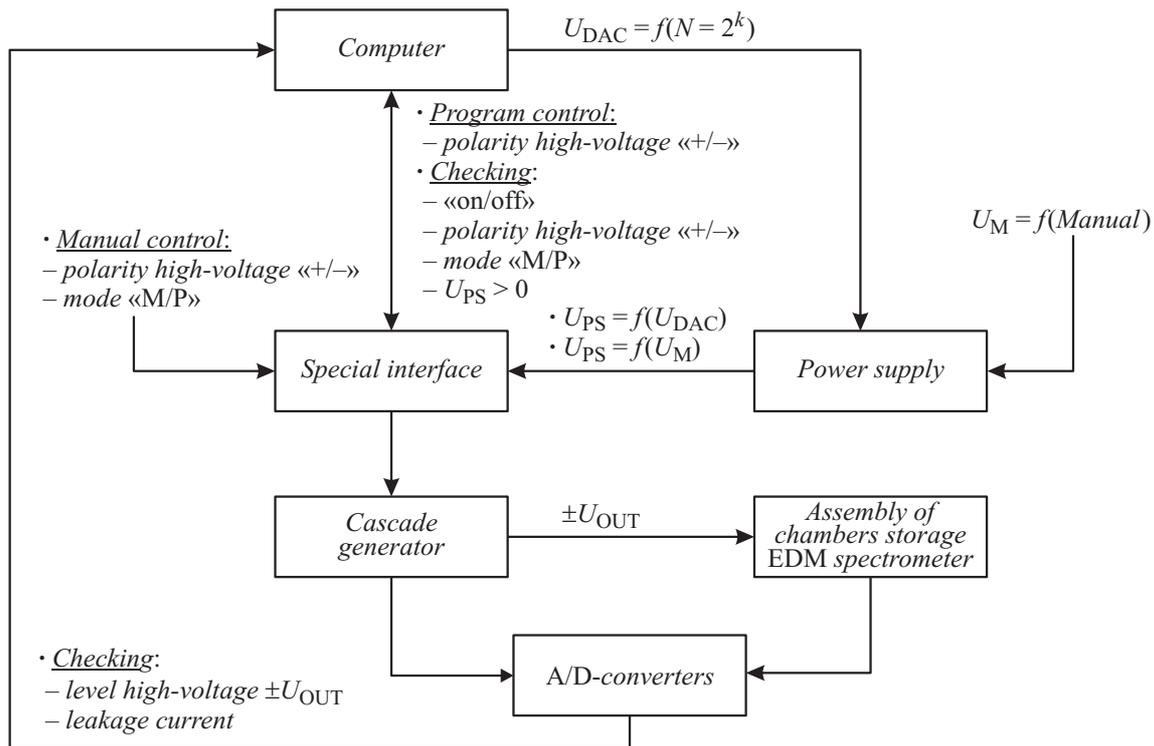


Рис. 4. Структура высоковольтной системы стенда.

высокочастотных импульсных помех. При разработке схемотехники резонансной системы выбран вариант использования последовательного резонанса с элементами резонансного контура, входящими в структуры высоковольтных трансформаторов. К таким элементам относятся приведенная к их первичной обмотке паразитная емкость C_p и индуктивность рассеяния L_{leak} .

Интерфейс имеет защитные функции от автоматического включения режима управления силовыми ключами, входящими в систему низковольтного энергоснабжения, при включении первичного источника (сеть, 220 V). Также запрещено изменение полярности выходного напряжения высоковольтного преобразователя при ненулевом напряжении источника низковольтного энергоснабжения.

Аппаратно-программное обеспечение управления и комплексного контроля параметров высоковольтной системы стенда включает в себя аналого-цифровые АD-конвертеры, специально разработанные с учетом требований к их функциональной устойчивости в условиях электрических пробоев, а также компьютер с его внешними устройствами в виде регистров ввода-вывода, цифро-аналогового DA-конвертера и счетчиков. Эти технические средства вместе с высоковольтным источником на основе каскадных умножителей, специализированным интерфейсом, низковольтным источником постоянного напряжения и высоковольтной нагрузкой в виде одной либо двух камер хранения образуют структуру высоковольтной системы стенда, представленную на рис. 4.

AD-конвертеры представляют собой преобразователи напряжение—частота, служащие для измерения и кон-

троля параметров высоковольтной системы, таких как величина выходного высокого напряжения источника и токов утечки двух камер хранения и высоковольтного ввода в вакуумную камеру стенда. В AD-конвертерах постоянное напряжение, пропорциональное измеряемым величинам, преобразуется в частоту и поступает на универсальную плату счетчиков на системной шине PCI.

Для программного управления режимами работы и контроля параметров специализированного интерфейса и источника питания высоковольтных трансформаторов каскадного генератора используется многофункциональный адаптер на системной шине PCI с регистрами ввода/вывода и цифроаналоговым преобразователем (DAC), который обеспечивает смену полярности высокого напряжения ($\pm U_{OUT}$) и управление уровнем выходного напряжения низковольтного источника ($U_{PS} = f(U_{DAC})$). Также данный адаптер обеспечивает контроль величины напряжения низковольтного источника ($U_{PS} > 0$), режима управления полярностью выходного напряжения высоковольтного источника (ручной/программный), состояния процесса генерации высокого напряжения (вкл/выкл) и знака установленной полярности высокого напряжения.

С целью повышения функциональной устойчивости в условиях возможных электрических пробоев в высоковольтных цепях каскадных генераторов или нагрузке и предотвращения появления паразитных контуров многофункциональный адаптер и универсальная плата счетчиков в составе компьютера имеют гальваническую развязку с низковольтным источником постоянного

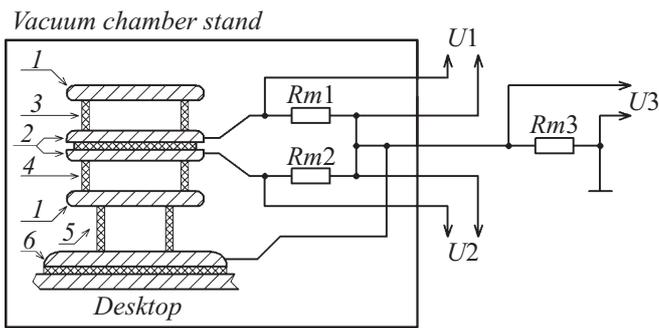


Рис. 5. Электрическая схема измерения токов полной сборки, где 1 — высоковольтные электроды, 2 — центральные электроды, 3, 4 — изоляторы из колец, 5 — опорный изолятор, 6 — опорный электрод.

напряжения, со специализированным интерфейсом и AD-конверторами посредством оптических линий связи.

Для управления высоковольтной системой стенда было разработано программное обеспечение, дающее возможность управлять и следить за параметрами высоковольтной системы стенда. При разработке программного обеспечения особое внимание уделено алгоритму скорости изменения высокого напряжения при изменении его величины либо полярности, а также возможность поддерживать величину высокого напряжения, при котором токи утечки не превышают заданного в программе максимального значения. В случае, если такое превышение возникает, величина высокого напряжения снижается с заданным шагом до тех пор, пока значение тока в нагрузке не войдет в заданные пределы. Разработанное программное обеспечение имеет два режима работы, позволяющее поднимать высокое напряжение. Первый режим позволяет поднимать уровень высокого напряжения и управлять сменой полярности дистанционно, не затрагивая органы управления самого интерфейса и низковольтного источника питания. При втором режиме подъем уровня напряжения и смена полярности осуществляются автоматически в соответствии с заданными параметрами, такими как начальное и конечное значения высокого напряжения для каждой полярности, скорость подъема и время удержания высокого напряжения на заданном уровне. Также во втором режиме происходит контроль токов утечки и запись в файл всех параметров высоковольтной системы. В обоих режимах значения напряжения и токов выводятся на экран компьютера, как в виде цифр, так и в виде диаграмм.

Возможности данной установки отлично проявились при проверке практически полной рабочей сборки камер хранения УХН в новом варианте исполнения. В данном варианте в отличие от предыдущего [1] нейтроны вводятся в камеры хранения по нейтроноводам через центральный электрод, разделенный на две электрически изолированные части, а высокое напряжение подается на верхний и нижний электроды. Между полированными центральным и высоковольтными электродами (диаметр 620 mm) были использованы изоляторы в виде

чистых (без покрытия) колец ситалла (диаметр 540 mm, $h = 90$ mm), образуя верхнюю и нижнюю камеры хранения. Вся сборка ставилась на опорный изолятор из кольца ситалла (диаметр 300 mm, $h = 50$ mm). Электрическая схема измерения приводится на рис. 5, где токи утечки по верхней камере и нижней камере, а также по опорному изолятору и высоковольтному вводу могут измеряться раздельно.

Результаты работы программы в автоматическом режиме тренировки показаны на рис. 6. На графиках показана смена полярности выходного напряжения и возникающие при этом токи перезарядки. На рис. 6, а показана начальная стадия тренировки изоляторов, когда напряженность электрического поля не приводит к появлению токов утечек и электрических пробоев. При этом уровень выходного напряжения около ± 120 kV.

Дальнейший подъем уровня напряжения в системе вызывает увеличение токов и электрические пробои

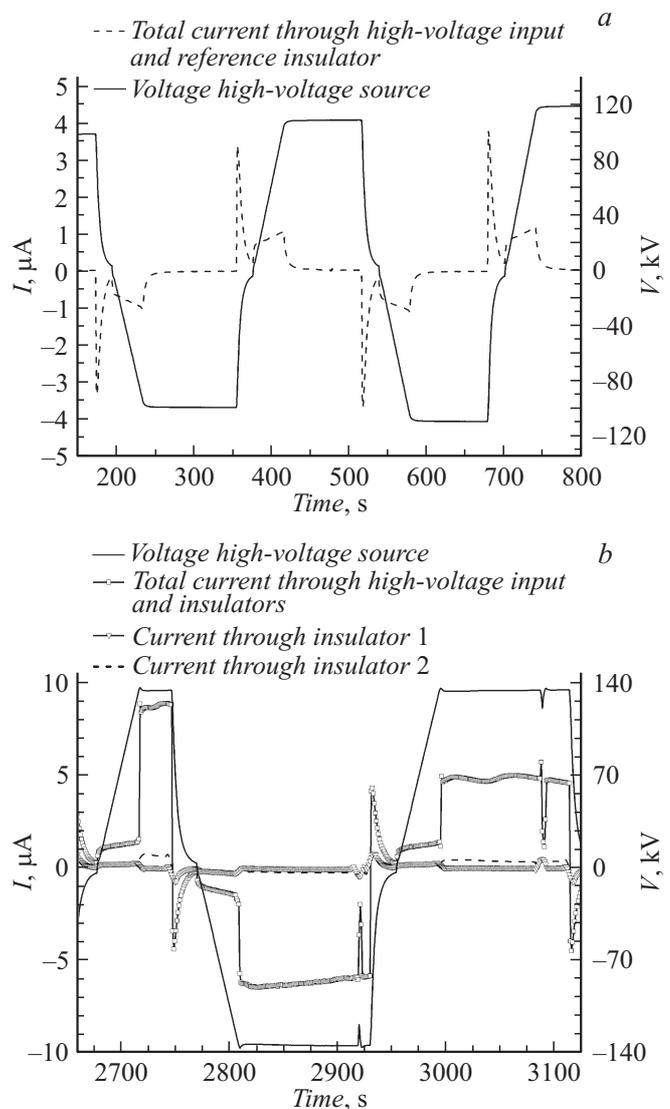


Рис. 6. Графики токов по изоляторам и уровень высокого напряжения источника в начальной (а) и промежуточной (б) стадиях тренировки.

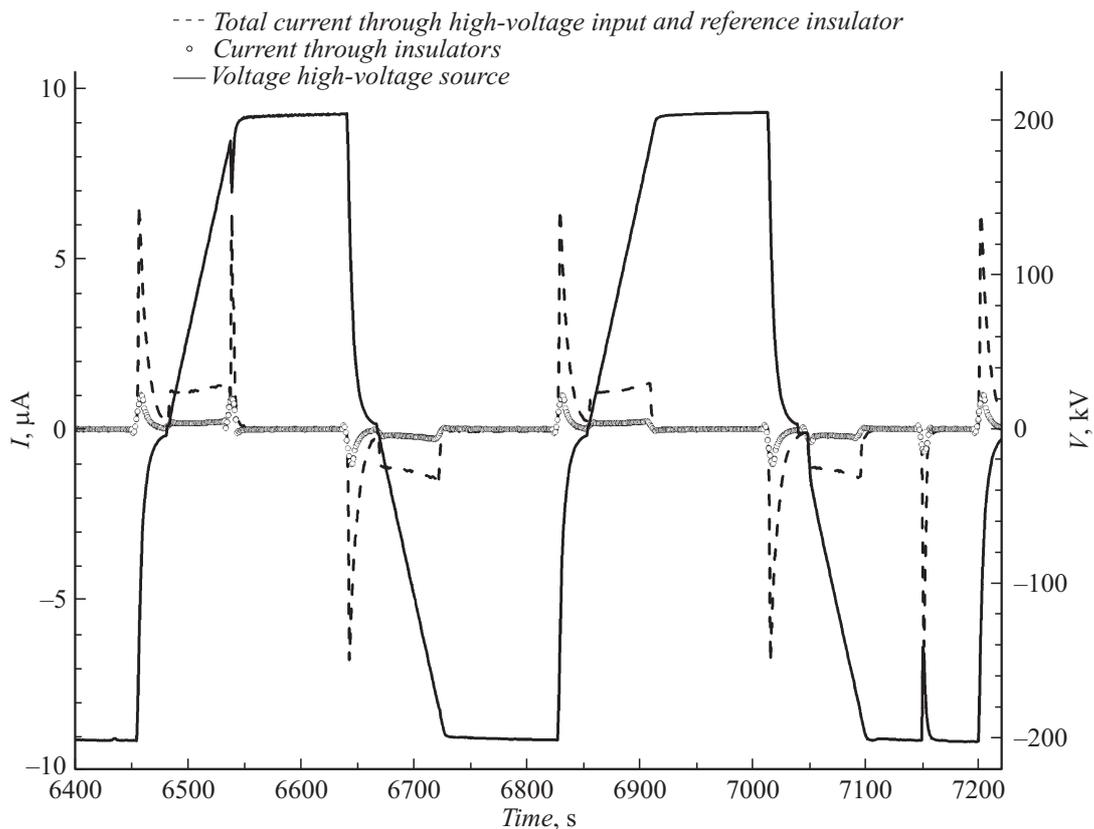


Рис. 7. Графики токов по изоляторам и уровень высокого напряжения источника по завершению тренировки.

(рис. 6, *b*) как в момент подъема напряжения, так и в момент его удержания. Данный график наглядно демонстрирует процесс подъема уровня напряжения и связанное с ним возникновение токов по разным изоляторам. Тренировка позволила за три рабочих дня поднять уровень высокого напряжения до 210 кВ на обеих полярностях, а значение токов утечки по камерам не превышало 10 нА (рис. 7).

Ближайшей задачей, которую предстоит решать с использованием стенда, является изучение влияния специальных покрытий внутренних поверхностей изоляторов камер хранения на предел высокого напряжения и величину токов утечки.

Создание высоковольтного стенда позволило в полной мере исследовать различные варианты сборки и практическую возможность реализации новой схемы ЭДМ-спектрометра в условиях максимально приближенным к существующим в реальной установке по измерению ЭДМ нейтрона, а также выработать методику тренировки изоляторов.

В заключение авторы благодарят Н.П. Микулину (НИИЭФА, С.-Петербург) за разработку и изготовление каскадных генераторов, а также Е.В. Сибера, А.В. Васильева, А.А. Костыгова и А.Н. Мурашкина из ПИЯФ за их помощь в проведении исследовательских работ. Кроме того, авторы выражают признательность сотрудникам цеха экспериментального оборудования во главе

с Е.П. Волковым за помощь в создании высоковольтного стенда, и особая благодарность И.В. Шока за разработку конструкторской документации.

Исследование выполнено в ФГБУ „ПИЯФ“ НИЦ „Курчатовский институт“ за счет гранта Российского научного фонда (проект № 14-22-00105).

Список литературы

- [1] Серебров А.П. и др. // Письма в ЭЧАЯ. 2015 Т. 12. С. 428–445.
- [2] Марченков В.В., Полошкин А.О., Сумбатян А.А., Соловей В.А. Высоковольтный преобразователь переменного напряжения в постоянное с управляемой полярностью. Патент № 129317. ГР ПМ РФ. 20.06.2013.
- [3] Полошкин А.О., Марченков В.В., Соловей В.А., Сумбатян А.А. Высоковольтный источник напряжения с управляемой полярностью и величиной до 200 кВ. Препринт ПИЯФ 2971. Гатчина, 2015.
- [4] Марченков В.В., Полошкин А.О., Сумбатян А.А., Соловей В.А. Интерфейс для контроля и управления разнополярным высоковольтным источником. Патент № 141785, ГР ПМ РФ, 07.05.2014.
- [5] Полошкин А.О., Марченков В.В., Соловей В.А., Сумбатян А.А. Специализированный интерфейс для управления и низковольтного энергоснабжения разнополярного высоковольтного источника с напряжением до 200 кВ. Препринт ПИЯФ 2975. Гатчина, 2015.