

СИСТЕМА ВЫСОКОВОЛЬТНОГО ПИТАНИЯ ЭЛЕКТРОННОГО ОХЛАЖДЕНИЯ БУСТЕРА NICA С ПОДАВЛЕНИЕМ ПУЛЬСАЦИЙ

*А. М. Батраков^а, М. И. Брызгунов^а, А. Д. Гончаров^а, И. А. Гусев^а,
А. А. Жариков^а, В. В. Пархомчук^{а,1}, В. Б. Рева^{а,б}, Д. В. Сеньков^{а,б,в}*

^а Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера Сибирского отделения РАН,
Новосибирск, Россия

^б Новосибирский государственный университет, Новосибирск, Россия

^в Новосибирский государственный технический университет, Новосибирск, Россия

Описана структура высоковольтного питания для системы электронного охлаждения бустерного инжектора коллайдера NICA. Модуль подавления пульсаций обеспечивает малый уровень пульсаций напряжения. Он позволил получить время охлаждения ионов Хе менее 0,1 с.

High-voltage power supply system for electron cooling of the NICA collider injection booster is described. Special module is used for voltage ripple suppression. It allowed us to obtain a cooling time of less than 0.1 s.

PACS: 29.20.dk; 29.20.db

В 2016 г. Институт ядерной физики поставил на кольцо бустера NICA систему электронного охлаждения (СЭО), предназначение которой — уменьшать поперечный эмиттанс циркулирующего в бустере ионного пучка перед инжекцией в нуклотрон [1]. При этом СЭО может работать в двух режимах: постоянном — когда охлаждение ионного пучка происходит на одной энергии, и «рамповом», когда охлаждение происходит последовательно на двух разных энергиях. Временные диаграммы, описывающие работу СЭО в двух указанных режимах, показаны на рис. 1. Одним из важных параметров, прямо влияющих на эффективность охлаждения ионного пучка, является стабильность высокого напряжения, задающего энергию охлаждающего электронного пучка. Точность поддержания энергии должна быть не хуже $\pm 0,5$ эВ на энергии инжекции 1,74–1,9 кэВ для охлаждающего электронного пучка и не хуже ± 5 эВ на высоких энергиях (30 кэВ).

Для системы в ИЯФ был спроектирован и изготовлен прецизионный высоковольтный источник, обеспечивающий точность поддержания высокого напряжения

¹E-mail: parkhomchuk@inp.nsk.su

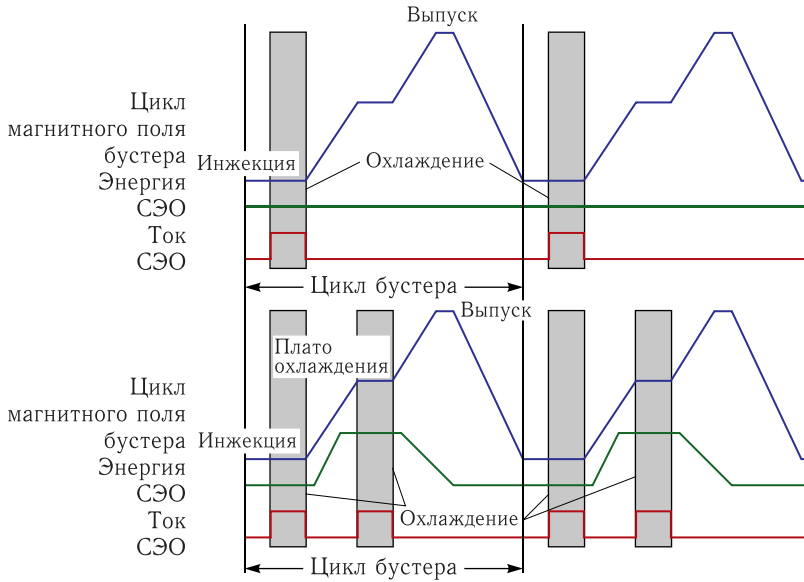


Рис. 1. Режимы работы СЭО бустера NICA

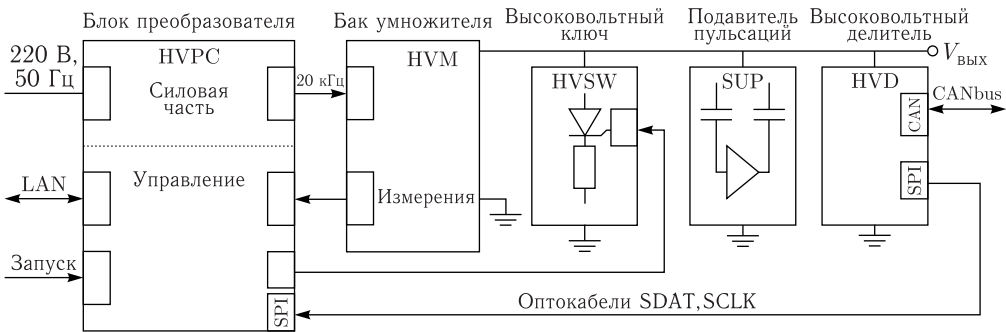


Рис. 2. Блок-схема высоковольтного источника

на уровне 10^{-5} от максимального выходного напряжения при рабочем выходном токе 1 мА. Для минимизации температурных дрейфов источник выполнен модульным, с расположением прецизионной части — высоковольтного делителя напряжения в отдельном от силовой части термостабилизированном отсеке. Для исключения наводок по землям делитель и его контрольная электроника были гальванически изолированы, а для передачи измерений использовалась цифровая оптоволоконная линия связи. Блок-схема источника показана на рис. 2.

При комплексных испытаниях установки электронного охлаждения в ИЯФ был зафиксирован повышенный уровень пульсаций высокого напряжения, связанный с работой системы передачи мощности в высоковольтный терминал СЭО (платформа с электроникой, управляющей электронной пушкой и коллектором электронного пучка, находящаяся под потенциалом, генерируемым источником высокого напряжения).

Система передачи мощности была выполнена в виде трехфазного трансформатора с высоковольтной изоляцией вторичных обмоток. Вторичные обмотки организовывали в терминале сеть 220 В, 50 Гц. Кроме того, дополнительный комплект вторичных обмоток использовался совместно с секционированным коммутируемым трехфазным выпрямителем для организации в терминале мощного питания 5 кВ, 15 кВт коллектора электронного пучка (рис. 3, а). Проблема возникновения пульсаций была связана с тем, что источники напряжения высоковольтного терминала соединялись с узлами установки электронного охлаждения (пушкой и коллектором) высоковольтными кабелями. Каждый кабель длиной около 15 м обладает емкостью на землю. При этом выход трехфазного выпрямителя коллектора имеет собственные пульсации на частоте 150 Гц. Переменное напряжение пульсаций шунтируется через емкости на землю кабелей, высоковольтного источника, высоковольтного терминала и системы передачи мощности. При этом образуется делитель, через который часть напряжения пульсаций добавляется к выходному напряжению прецизионного высоковольтного источника. На рис. 3, б показан механизм появления пульсаций 150 Гц в высоком напряжении.

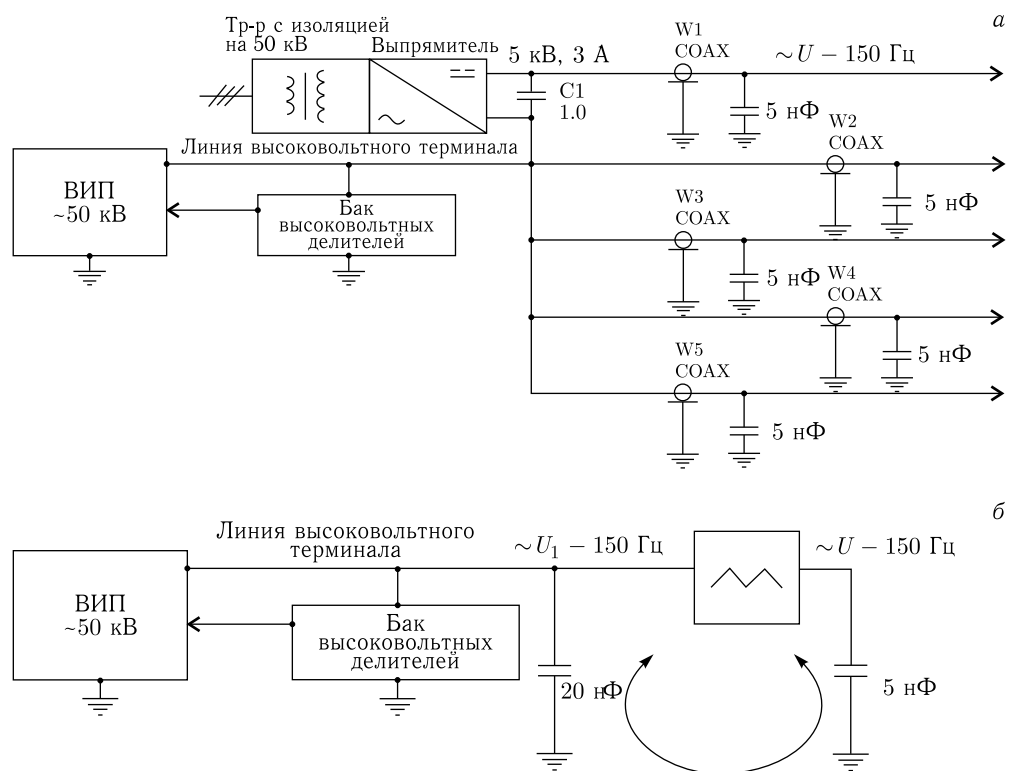


Рис. 3. Рождение пульсации 150 Гц в напряжении высоковольтного терминала. а) Подключение источника питания коллектора (5 кВ, 3 А) к выходу высоковольтного источника питания (ИП) в высоковольтном терминале СЭО. б) Механизм влияния пульсаций выпрямленного напряжения ИП коллектора на стабильность выходного напряжения ВИП

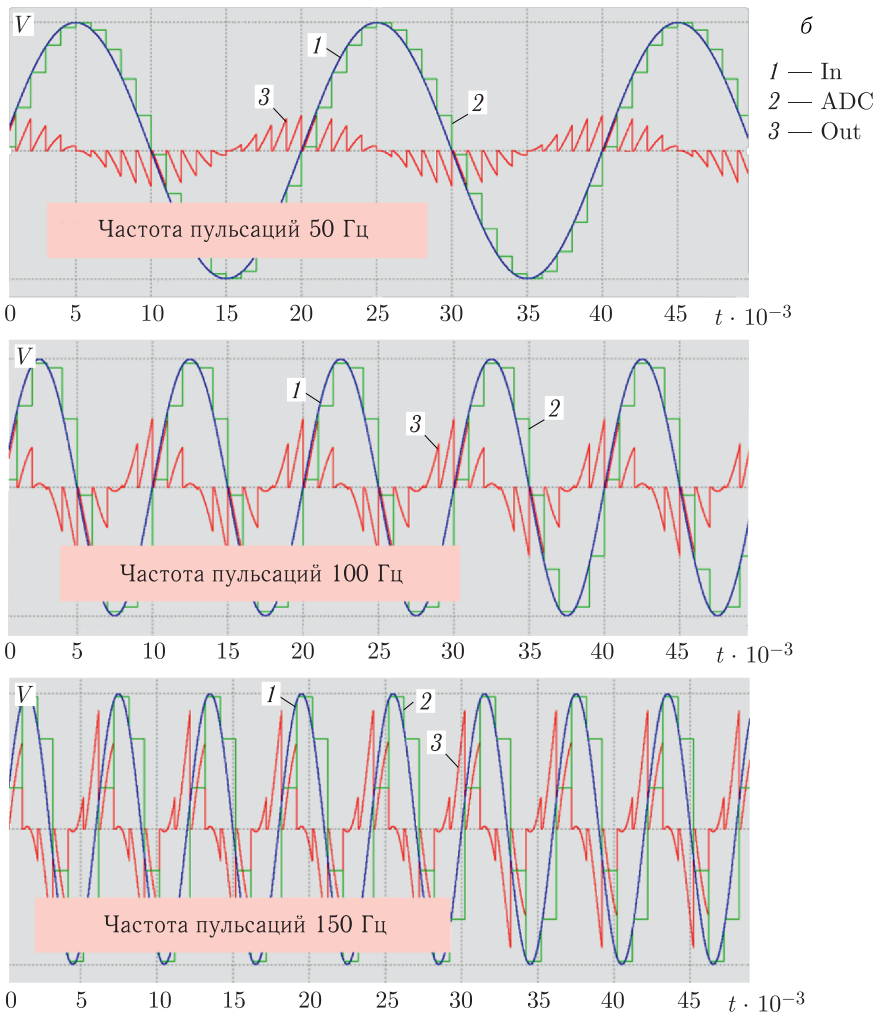
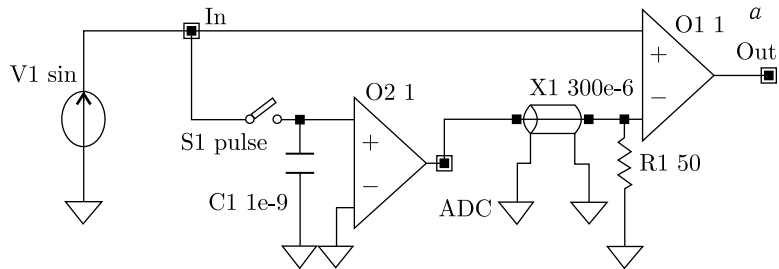


Рис. 4. а) Линейная модель системы стабилизации высоковольтного источника, учитывающая влияние параметров временной дискретизации сигнала с высоковольтного выпрямителя. б) Результаты моделирования подавления пульсаций для разных частот

Уровень пульсаций высокого напряжения составлял ± 20 В, что превышало минимально допустимый порог более чем на порядок.

Теоретически обеспечить подавление помехи на выходе можно усилением в цепи обратной связи высоковольтного источника, однако на практике данный путь оказался неоптимальным.

Для проверки путей подавления 150-Гц помехи была построена модель системы. Результаты моделирования показаны на рис. 4. Для исследования взята упрощенная линейная модель высоковольтного источника (усилитель O2 на схеме). Результаты моделирования показывают, что для выбранной для высоковольтного делителя частоты дискретизации данных (1 кГц) и задержки в цепи передачи 300 мкс подавление пульсаций частотой 150 Гц невозможно. Увеличение частоты дискретизации, в теории, позволяет получить подавление. Для увеличения подавления на порядок частота дискретизации должна составлять 15 кГц при задержке линии передачи данных не выше 50 мкс.

Однако эта модель не учитывает нелинейный характер высоковольтного источника (O2 на схеме), связанный с тем, что он представляет собой выпрямитель, работающий на емкость, которая разряжается нагрузкой. В установке электронного охлаждения разрядный ток является в номинальном режиме достаточно малым: ток создается резисторами делителей, нагрузочными сопротивлениями — это около 100 МОм нагрузки, и потерями электронного пучка в системе пушка–коллектор. В целом величина тока высоковольтного источника составляет от десятков микроампер на низких (единицы килоэлектронвольт) энергиях до нескольких сотен микроампер на десятках килоэлектронвольт. Если в модель добавить учет данного обстоятельства (рис. 5),

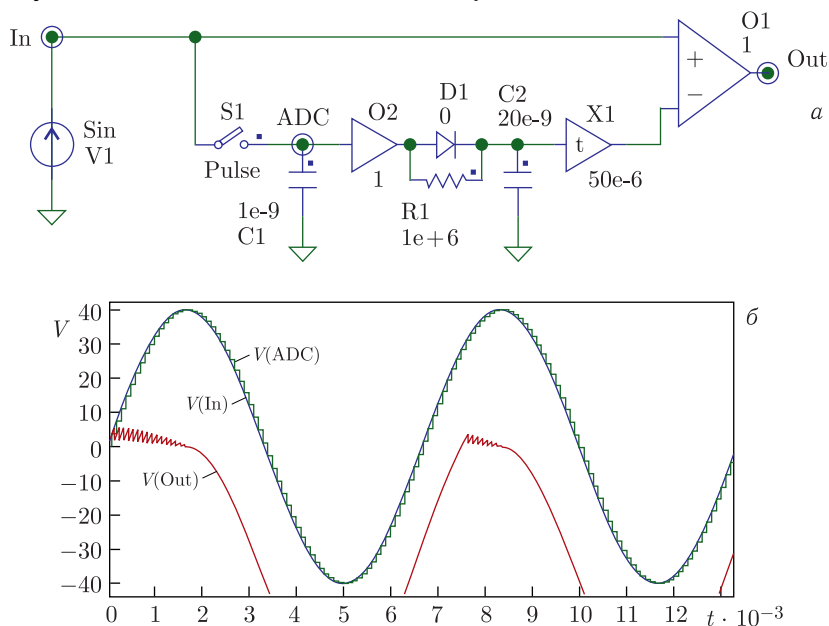


Рис. 5. а) Модель системы стабилизации ВИП с учетом нелинейности источника. б) Результаты моделирования подавления пульсаций

то оказывается, что без создания достаточного выходного тока, т.е. добавления специального мощного высоковольтного сопротивления даже увеличение частоты дискретизации выходного напряжения и уменьшение задержек канала передачи данных

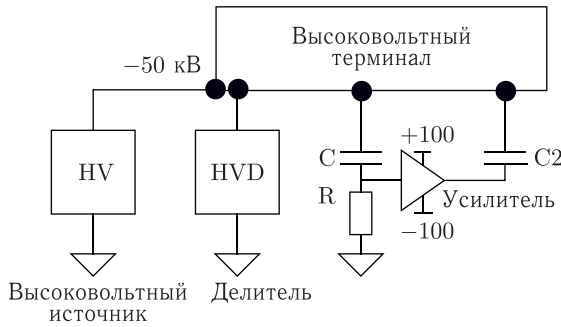


Рис. 6. Блок-схема подавителя

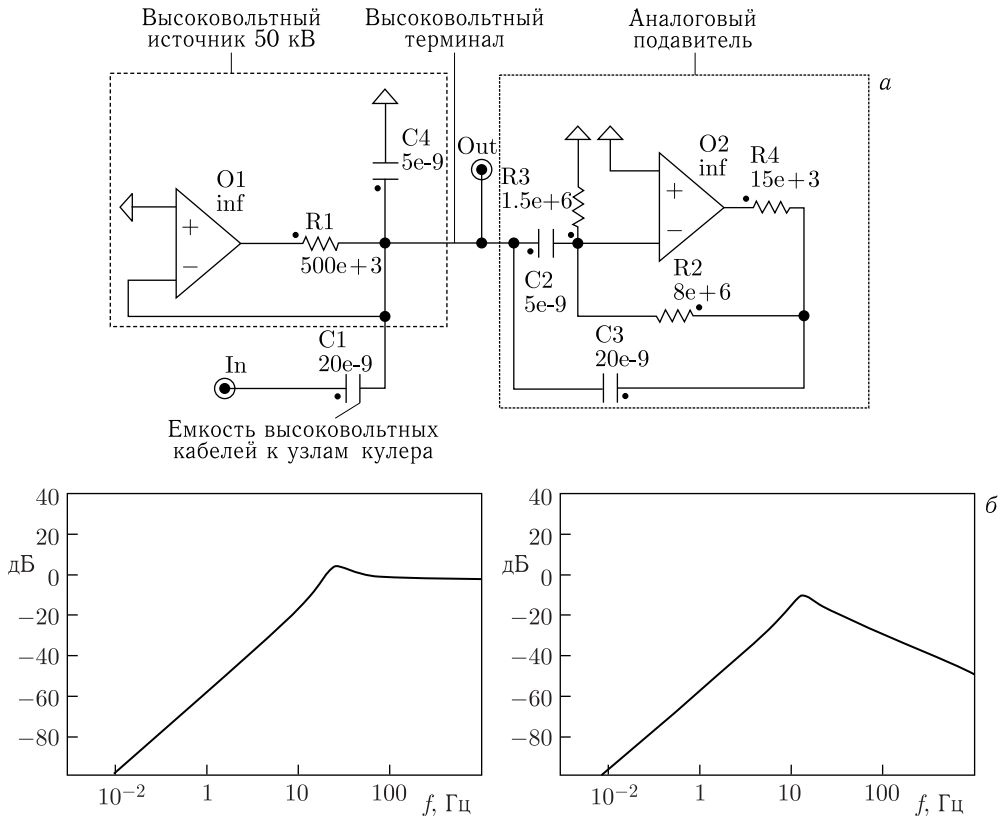


Рис. 7. Согласование полосы работы подавителя и высоковольтного источника. а) Модель для анализа частотных характеристик системы. б) Амплитудно-частотная характеристика (АЧХ) высоковольтного источника (слева) и высоковольтного источника вместе с аналоговым подавителем (справа)

и контроллера высоковольтного источника не приводит к подавлению инжектированной помехи на выходе.

Поэтому был выбран другой путь: создание независимого широкополосного подавителя на основе линейного усилителя, при этом полоса работы подавителя отвязана от полосы высоковольтного источника, так что перестройка напряжения по заданной программе и подавление низкочастотных пульсаций остаются за высоковольтным источником, а подавление пульсаций выше полосы работы цифровой системы осуществляется подавителем. При этом в режиме перестройки напряжения (скорость до 500 В/мс) подавитель на первых миллисекундах входит в насыщение (его выходное напряжение доходит до максимальных 100 В и далее не изменяется) и не мешает процессу, а после окончания за 10–20 мс выходит из насыщения и начинает работать.

Сама идея дополнительного подавления, конечно, не нова и широко применяется в прецизионных источниках для ускорительной физики. Однако обычная реализация ее связана с мощными источниками тока на основе тиристорных выпрямителей. При этом последовательно с нагрузкой включается трансформатор, на который подается высокочастотный сигнал коррекции с усилителя ошибки, подавляющий в нагрузке пульсации выпрямителя. Таким образом удается создать системы с относительным уровнем нестабильности и пульсаций тока в нагрузке до 10^{-6} .

На рис. 6 показана блок-схема разработанного подавителя. Он представляет собой линейный усилитель с выходным напряжением 100 В, на который через емкостный делитель подается сигнал пульсаций. Выход усилителя через развязывающую высоковольтную емкость подключается к терминалу. На рис. 7 показано согласование частотных характеристик подавителя и высоковольтного источника.

Конструктивно подавитель представляет собой независимый модуль, который был интегрирован в высоковольтный терминал и крепится к нему на конденсаторе делителя и развязывающем конденсаторе (рис. 8). Рис. 9 показывает результаты испытаний источника с активацией подавителя.

Видно, что после включения подавителя пульсации и шумы выходного напряжения, имевшие размах ± 20 В, упали до уровня около $\pm 0,5$ В.

Подключение подавителя позволило вернуть уровень пульсаций и нестабильность в выходном напряжении к требуемому для работы СЭО уровню, при этом правильным разделением частотных диапазонов работы систем была в полном объеме сохранена возможность СЭО работать с глубокой (в десятки раз) перестройкой энергии для двухступенчатого охлаждения ионного пучка бустера NICA в цикле ускорения.



Рис. 8. Конструктивное исполнение модуля подавителя

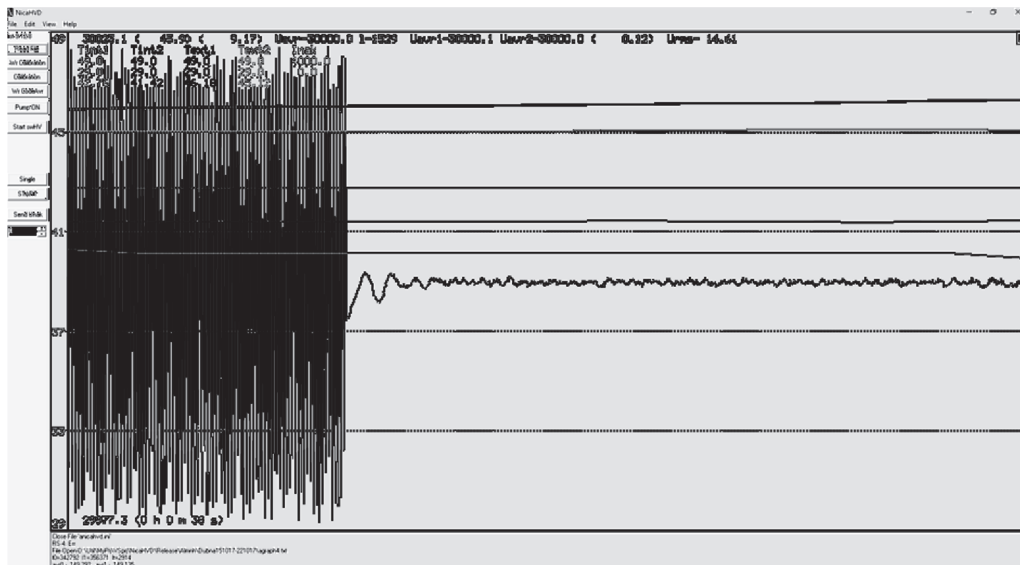


Рис. 9. Уменьшение пульсаций высокого напряжения (30 кВ) при включении подавителя (по вертикальной оси — выходное напряжение (29,977–30,023 кВ), по горизонтальной — время, шкала 2 с)

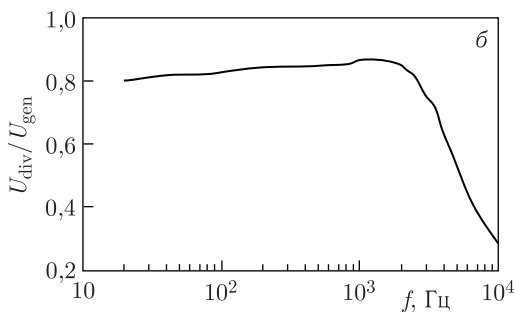
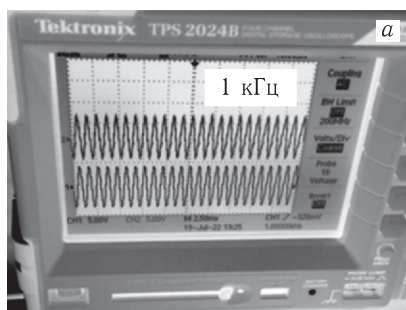


Рис. 10. а) Демонстрация передачи модуляции напряжения на высоковольтный терминал. б) АЧХ передачи сигнала от опоры системы подавителя пульсаций к напряжению высоковольтного источника (терминала)

Использование подавителя пульсаций при экспериментах на СЭО открывает дополнительные экспериментальные возможности для формирования заданного распределения в пространстве скоростей охлаждаемых ионов. Например, в работе [2] предложено использовать плоское распределение в пространстве скоростей для вывода частиц в виде отдельных порций для формирования правильного дозового поля при облучении пациентов пучками тяжелых заряженных частиц при терапии рака. Другое применение может быть связано с избыточным продольным охлаждением, которое приводит к монохроматизации пучка и сильному подавлению затухания Ландау. Это может привести к различного рода коллективным неустойчивостям, что, вероятно, яв-

ляется одной из причин явления, наблюдаемого на многих установках, под названием electron heating [3, 4]. Для подавления неустойчивостей приложение переменного сигнала малой амплитуды в качестве опоры для системы подавления пульсаций приводит к возникновению переменной составляющей в выходном напряжении высоковольтного источника. Это приводит к достаточно быстрой модуляции энергии электронов и вместе с ней к формированию разброса скоростей в ионном пучке. На рис. 10, а показано, что приложение в качестве опоры напряжения величиной порядка 5 В приводит к появлению эквивалентных пульсаций высокого напряжения. На рис. 10, б показана амплитудно-частотная характеристика для данной передаточной функции. Видно, что практически оказывается доступна полоса частот в области до 1 кГц.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Брызгунов М. И., Бублей А. В., Гончаров А. Д., Панасюк В. М., Пархомчук В. В., Рева В. Б. Состояние дел по производству установки электронного охлаждения для бустера комплекса NICA // Письма в ЭЧАЯ. 2016. Т. 13, № 7(205). С. 1238–1243.
2. Vostrikov V. A., Kiselev V. A., Levichev E. B., Parkhomchuk V. V., Reva V. B., Sinyatkin S. A Project for Synchrotron with Electron Cooling for Cancer Therapy // Phys. Part. Nucl. Lett. 2012. V. 9, No. 4–5. P. 429–432.
3. Parkhomchuk V. Comparison of Hollow Electron Devices and Electron Heating // Proc. of COOL 2007, Bad Kreuznach, Germany, 2007. TUM1103. P. 64–67; <https://accelconf.web.cern.ch>.
4. Пархомчук В., Скринский А. Н. Электронное охлаждение — 35 лет развития // УФН. 2000. Т. 170, вып. 5. С. 473–493.

Получено 25 августа 2023 г.