

УДК 621.384.66

СИСТЕМА АВАРИЙНОГО КОНТРОЛЯ ПОТЕРЬ ПУЧКА НА ОСНОВЕ ИНДУКЦИОННЫХ ДАТЧИКОВ ТОКА ДЛЯ ЛИНЕЙНОГО УСКОРИТЕЛЯ ПРОЕКТА DARIA

© 2024 г. С. А. Гаврилов^{a, b, *}, В. А. Гайдаш^a, А. И. Титов^{a, b}

^aИнститут ядерных исследований РАН, Москва, 117312 Россия

^bМосковский физико-технический институт, Долгопрудный, 141700 Россия

*e-mail: s.gavrilov@inr.ru

Поступила в редакцию 13.06.2024 г.

После доработки 14.08.2024 г.

Принято к публикации 14.08.2024 г.

Контроль потерь пучка является одной из критически важных задач при эксплуатации высокоинтенсивных ускорителей заряженных частиц. В работе представлена концепция системы неразрушающего контроля потерь пучка на основе индукционных датчиков тока для линейного резонансного ускорителя протонов в составе компактного источника нейтронов DARIA. Рассмотрены особенности практической реализации и эксплуатации предлагаемых индукционных датчиков тока на основе ферритовых сердечников и необходимой предусилительной электроники с использованием трансимпедансных усилителей. Особое внимание уделено методу контроля разницы регистрируемых токов пучка между двумя последовательными датчиками и принципам формирования аварийного сигнала для реализации системы быстрой аварийной защиты ускорителя. Контроль разницы токов реализован на быстром интегрировании и взаимном сравнении заряда импульсов тока пучка, проходящих через датчики, что повышает точность измерений. Кроме того, есть возможность выбора нескольких дискретных значений измеряемой разницы: для номинального режима работы и процедуры настройки ускорителя, когда потери пучка могут существенно возрасти. Система сохраняет работоспособность на любой частоте следования импульсов тока пучка, а для предотвращения ложной блокировки от возможных наводок и помех итоговый аварийный сигнал формируется как сумма трех последовательных срабатываний схемы сравнения на частоте следования импульсов пучка.

Ключевые слова: сильноточный ускоритель, линейный ускоритель протонов, система диагностики пучка, неразрушающая диагностика, индукционный датчик тока, трансформатор тока пучка, предусилительная электроника, трансимпедансный усилитель, потери пучка, контроль разницы тока пучка.

DOI: 10.31857/S1028096024120131, EDN: QWG0EZ

ВВЕДЕНИЕ

Проект DARIA (нейтронный источник Dedicated to Applied Research and Industrial Applications) — компактный источник нейтронов для фундаментальных исследований, промышленного использования и образовательных задач, разрабатываемый на основе сильноточного линейного ускорителя (ЛУ) протонов [1] с проектными характеристиками, указанными в табл. 1.

Предложенная в [2] концепция системы диагностики пучка для линейного ускорителя DARIA (рис. 1) учитывает значительную импульсную (~1.3 МВт) и среднюю (~13 кВт) мощности пучка в совокупности с относительно низкой энергией (<13 МэВ) и рекомендует построение системы на основе устройств, использующих неразрушающие способы измерений ключевых параметров пучка, в частности, индукционные датчики тока (ИДТ). Однако вопрос контроля потерь пучка

Таблица 1. Основные характеристики пучка протонов в линейном ускорителе DARIA

Характеристика	Значение
Энергия пучка на выходе источника, МэВ	0.06
Энергия пучка на выходе секции с пространственно-однородной квадрупольной фокусировкой (ПОКФ), МэВ	3.3
Энергия пучка на выходе ускорителя, МэВ	13
Импульсный ток, мА	До 100
Длительность импульса тока, мкс	100
Частота следования импульсов, Гц	До 100

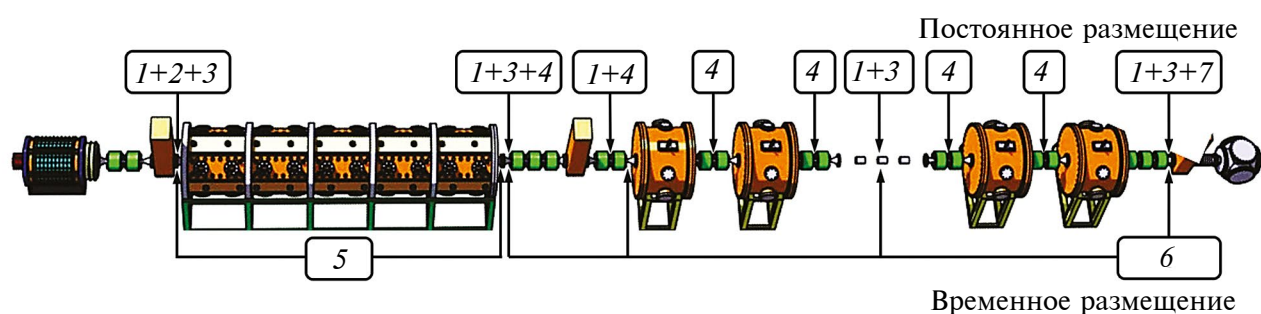


Рис. 1. Схема возможного расположения оборудования системы диагностики пучка вдоль линейного ускорителя протонов проекта DARIA: 1 — индукционный датчик тока; 2 — цилиндр Фарадея; 3 — проволочный сканер; 4 — датчик положения пучка; 5 — измеритель эмиттанса; 6 — измеритель формы сгустков; 7 — ионизационный монитор поперечного сечения.

в подобном линейном ускорителе остается открытым, так как традиционные датчики потерь: фотодетекторы, сцинтилляторы или газовые счетчики при такой энергии протонного пучка имеют либо крайне низкую эффективность, либо в принципе не применимы.

При прохождении пучка от источника до выхода ускорителя неизбежно возникновение потерь пучка, и чем больше запасенная в пучке мощность, тем важнее осуществление непрерывного контроля тока пучка на разных участках машины, в том числе и в каналах транспортировки пучков низких и средних энергий. В сильноточных ускорителях ионов потери пучка могут приводить к термомеханическим повреждениям вплоть до сквозного прожига стенок элементов ускоряюще-фокусирующего канала в течение нескольких импульсов тока пучка.

В связи с этим, исходя из опыта настройки и эксплуатации сильноточного линейного ускорителя протонов и отрицательных ионов водорода ИЯИ РАН [3], к использованию в проекте DARIA мы предлагаем простую и эффективную систему

аварийного контроля потерь пучка на основе индукционных датчиков тока под условным названием “Δ ИДТ”.

ИНДУКЦИОННЫЙ ДАТЧИК ТОКА

Индукционный датчик тока, называемый также “трансформатором тока пучка” [4], является наиболее распространенным устройством для построения систем измерений тока, его используют на самых разных ускорителях и каналах транспортировки как электронных, так и ионных пучков с любой временной структурой благодаря следующим преимуществам. Во-первых, измерения на основе детектирования магнитного поля пучка — не возмущающие и, как следствие, это дает возможность построения систем непрерывного контроля и обратной связи для управления интенсивностью пучка. Во-вторых, результаты измерений независимы от других параметров пучка при условии корректно собранной конструкции. В-третьих, выходной сигнал прямо пропорционален измеряемому току пучка, что делает возможным точную абсолютную калибровку датчика.

Название “трансформатор тока пучка” связано с тем, что конструкция ИДТ имеет характерный вид трансформатора, в котором пучок, проходящий сквозь сердечник тороидальной формы из материала с высокой магнитной проницаемостью, играет роль “первичной обмотки”, а N витков изолированного провода, намотанные вокруг сердечника, являются “вторичной обмоткой” трансформатора. Таким образом, измеряемый сигнал в обмотке создан переменным магнитным полем, формируемым током пучка, и представляет собой переменное напряжение, частота которого равна частоте следования импульсов тока пучка ускоренных частиц, а для проведения точной абсолютной калибровки датчика использован дополнительный одиночный виток для подачи известного значения тока, имитирующего ток пучка. Наличие тороидального сердечника, в котором замыкаются линии магнитного поля, позволяет также измерять только азимутальную составляющую поля тока пучка, в результате чего величина сигнала оказывается слабо зависящей от размера и положения пучка, проходящего сквозь ИДТ.

Существует большое количество конструкций ИДТ, реализованных на практике [5], в частности, наибольшее распространение в ускорительном сообществе получили датчики французской фирмы Bergoz Instrumentation [6]. Одним из возможных универсальных вариантов реализации является полностью вакуумированная конструкция на основе стандартных фланцев ConFlat с использованием вакуум-совместимых материалов, разработанная ИЯИ РАН (рис. 2). Фотография двух подобных ИДТ, изготовленных для проекта DARIA, представлена на рис. 3.

В качестве сердечника выбрано кольцо без диэлектрического покрытия фирмы Cosmo Ferrites (Индия) [7] из MnZn-феррита CF197 с начальной магнитной проницаемостью ~ 7000 и индукцией насыщения ~ 400 мТл. Сигнальная обмотка и одиночный калибровочный виток выполнены из медного провода в полиимидной изоляции, удовлетворяющей требованиям радиационной стойкости и вакуумной чистоты. Выбор ферритового сердечника объясняется существенным снижением стоимости ИДТ благодаря отказу от дорогостоящих ленточных сердечников из аморфных или нанокристаллических сплавов и металлокерамической вставки, необходимой для их использования в условиях высокого вакуума с остаточным давлением $< 10^{-7}$ мбар. Возможность эксплуатации ферритовых колец в вакууме такого уровня подтверждена многолетним опытом эксплуатации ускорителей в ИЯИ РАН, а также в других ускорительных комплексах [8].

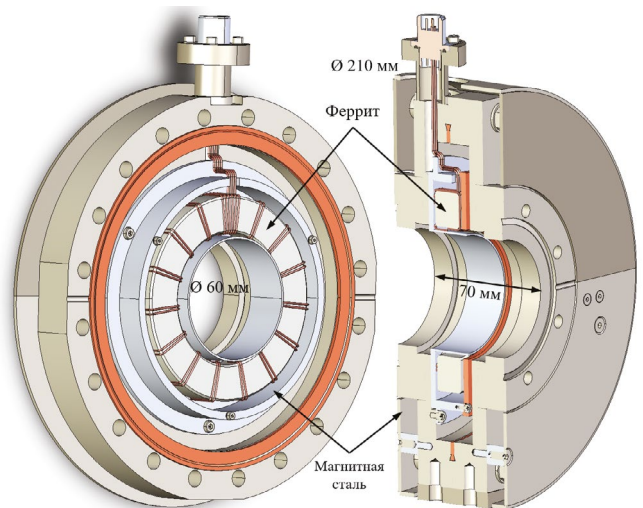


Рис. 2. Трехмерная модель ИДТ, разработанного ИЯИ РАН.

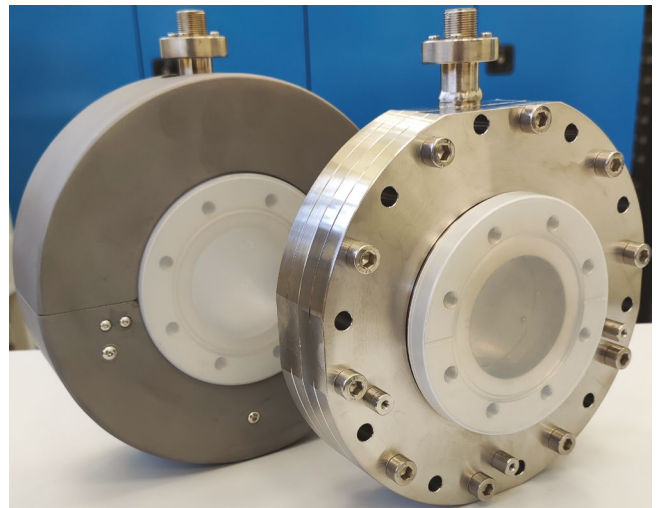


Рис. 3. Фотография двух ИДТ, изготовленных для проекта DARIA.

Для снижения уровня статических и низкочастотных магнитных полей от различных систем [9], включая квадрупольные линзы, предусмотрено использование двух экранов из магнитной нержавеющей стали. Внутренний экран сердечника изготовлен в виде корпуса с осесимметричной кольцевой щелью. Внешний экран полностью закрывает весь вакуумный корпус датчика.

Для правильной обработки результатов измерений важное значение имеет не только амплитуда сигнала, но и форма временного отклика датчика на заданный импульс тока пучка. В связи с этим, обычно используют понятия времени нарастания фронта импульса и времени спада вершины импульса. Разработанные ИДТ укомплектованы трансимпедансными [10] предварительными



Рис. 4. Фотография изготовленного предварительно-го усилителя ИДТ.

усилителями (рис. 4), благодаря которым фронт импульса не превышает 250 нс, а спад вершины составляет $<0.02\%$ мкс. Схема усилителей содержит в себе источник калибровочного тока и каскад реле для переключения измеряемого диапазона тока пучка от 0.1 до 100 мА. Пример реального сигнала ИДТ, регистрируемого цифровой системой сбора и обработки данных ускорителя, представлен на рис. 5.

КОНТРОЛЬ РАЗНИЦЫ ТОКОВ

Контроль разницы токов можно осуществлять так называемой ячейкой “ Δ ИДТ” — аналоговой ячейкой быстрой аварийной защиты линейного ускорителя по разности токов, функциональная схема работы которой приведена на рис. 6.

На вход ячейки поступают два сигнала от предварительных усилителей: основной сигнал от первого по ходу пучка ИДТ-1 и сигнал, сравниваемый с основным, от второго по ходу пучка ИДТ-2, а также импульс синхронизации, соответствующий частоте следования импульсов тока пучка в линейном ускорителе. Сигнал синхронизации

запускает формирователь, который включает интеграторы на время длительности измеряемых импульсов тока пучка, в результате чего фактически сравниваются не амплитуды сигналов, а интегрированный заряд каждого импульса тока. Следует отметить, что границы интервала интегрирования $T_{\text{инт}}$ должны быть выбраны максимально близко к фронтам импульса тока, для того чтобы минимизировать интегрирование паразитных фонов и наводок вне импульса. К выходу интегратора Инт.1 подключен многоступенчатый переключаемый резистивный делитель напряжения с отводами в 1, 2, 5, 10 % от входного. С выходов интеграторов сигналы Инт.1 и Инт.2 поступают на аналоговую схему вычитания (Инт.1 — Инт.2), и результат вычитания сравнивается на компараторе с выбранной на делителе долей основного интеграла Инт.1. Если результат вычитания, т. е. эффективные импульсные потери заряда пучка, превышает выбранный предел, то на выходе схемы сравнения появляется логический сигнал “Авария”.

Можно отметить, что время прохождения пучка между двумя датчиками никак не сказывается на работе схемы сравнения токов, потому что это время (с учетом времени прохождения сигналов до ячейки “ Δ ИДТ” и времени полного срабатывания всей электронной схемы), как правило, значительно меньше периода следования импульсов тока пучка, который, в частности, для предельного проектного режима работы ускорителя DARIA составляет 10 мс, т. е. предложенная схема контроля может обрабатывать каждый импульс тока. Однако критически важным фактором является равенство коэффициентов усиления исходного сигнала в предусилителях ИДТ (с учетом разной длины линий передачи данных от предусилителей до ячейки схемы сравнения). Поэтому при настройке системы в обязательном порядке вручную выравнивают величину итогового усиления (по значениям сигналов калибровочных токов ИДТ), после чего выбирают порог сравнения двух обрабатываемых сигналов (в процентах), кото-

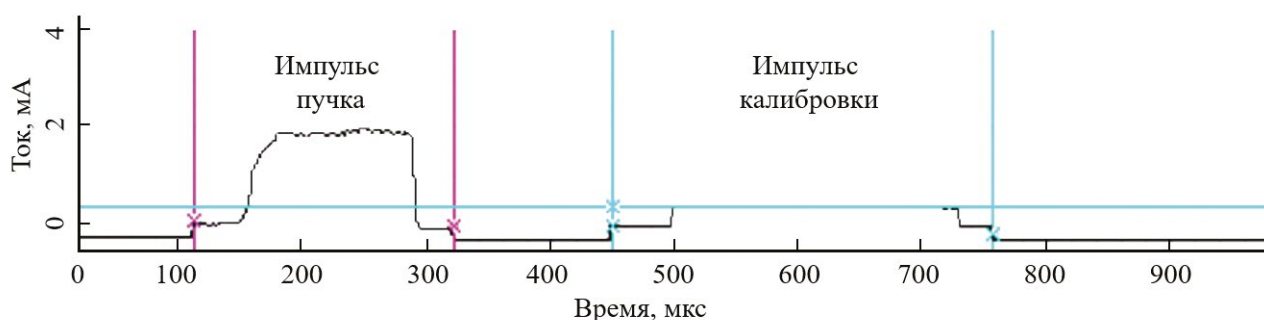


Рис. 5. Пример результата работы программы обработки сигнала ИДТ.

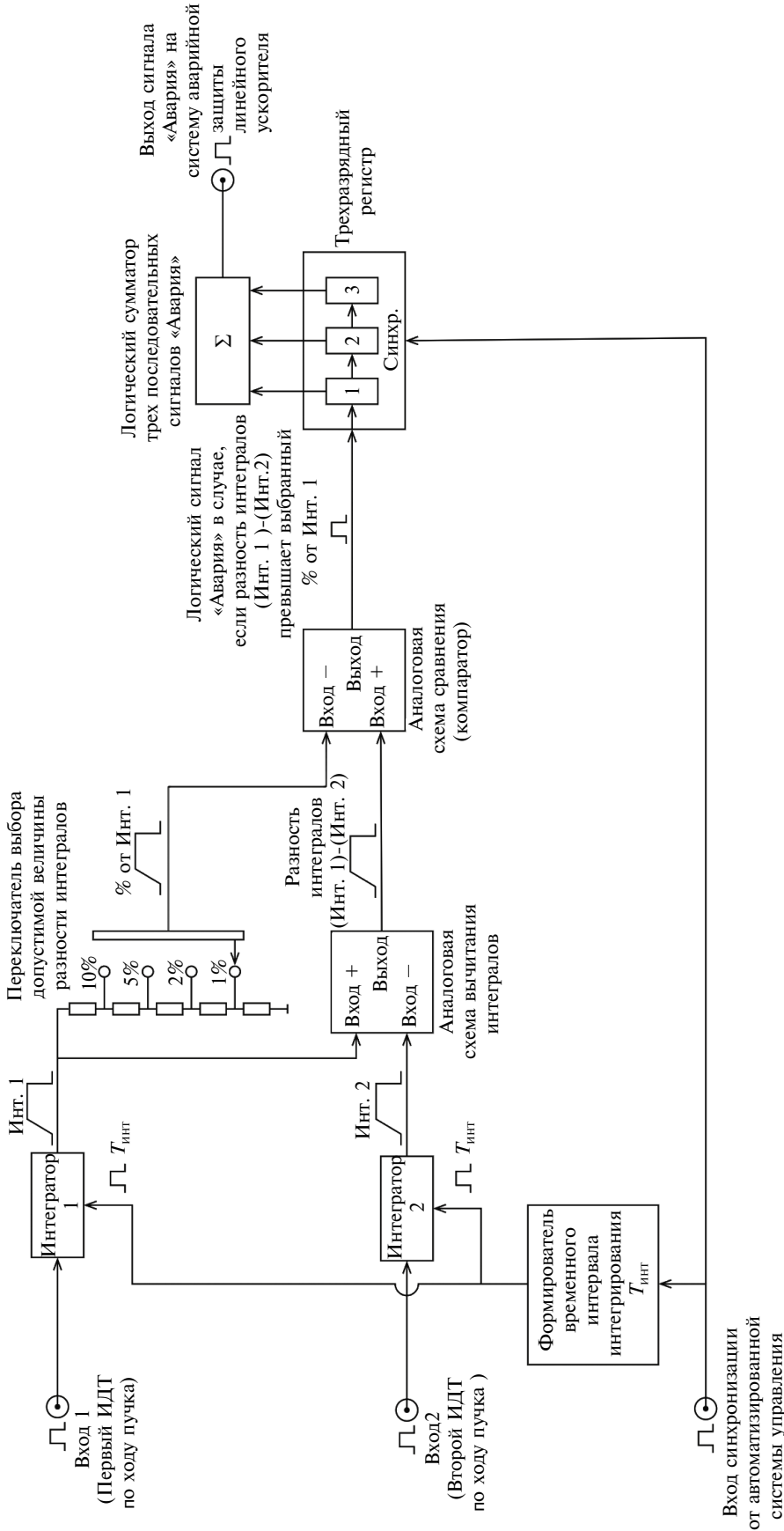


Рис. 6. Функциональная схема ячейки “Δ ИДТ”.

рый можно повысить в случае наводок и шумов, искажающих форму импульса, либо, наоборот, уменьшить, если наводки подавлены и не влияют на процедуру сравнения регистрируемых импульсов тока.

При работе сильноточных ускорителей необходимо учитывать, что даже одиночный сфокусированный импульс тока пучка, особенно в случае пучков с относительно низкой энергией ~5–50 МэВ, может вызвать разрушение целостности каких-либо элементов ускорительного тракта, в том числе и вакуумной стенки ионопровода, если воздействие оказывается точечным. При попадании такого пучка на стенку по касательной также могут происходить нагрев и последующая механическая деформация. Кроме того, в случае возникновения потерь пучка в объеме высокочастотного ускоряющего резонатора, может снижаться его электрическая прочность с потенциальным развитием мультитакторного разряда и возникновением электрических пробоев. Отдельно следует учесть, что при энергиях протонов свыше ~10 МэВ потери пучка приводят к паразитной непредусмотренной активации элементов ускорительного тракта. Так как схема сравнения токов обрабатывает каждый импульс, то она может быть настроена для выдачи аварийного сигнала по одиночному событию, однако такая работа схемы может быть нестабильной в условиях большого числа различных помех и наводок от мощных подсистем ускорителя (источники высокочастотного питания, вакуумные и водяные насосы, импульсные элементы магнитооптики канала). Поэтому для предотвращения ложных срабатываний от возможных помех на линиях входных сигналов от ИДТ-1 и ИДТ-2 был реализован принцип последовательного трехкратного срабатывания схемы для формирования итогового сигнала запрета. Сигнал “Авария” с выхода компаратора поступает на вход трехразрядного логического регистра. Если аварийные сигналы возникают последовательно один за другим не менее трех раз с частотой следования импульсов тока пучка, то на выходе регистра вырабатывается суммарный импульсный сигнал “Авария”, который передается в систему аварийной защиты линейного ускорителя для последующей блокировки пучка. Схема работает при любой частоте следования импульсов тока. По желанию пользователей для каждого конкретного случая может быть организован произвольный индивидуальный алгоритм генерации сигнала запрета.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Индукционные датчики традиционно обеспечивают эффективную диагностику амплитуды

и длительности тока пучка в ускорителях. Использование дополнительной предусилительной и обрабатывающей электроники позволяет расширить их функциональные возможности. В частности, для линейного ускорителя проекта DARIA была предложена система “Δ ИДТ” для контроля разницы измеряемых токов пучка при прохождении двух последовательно установленных индукционных датчиков тока, которая может быть использована для контроля потерь пучка с целью быстрой аварийной защиты сильноточного ускорителя.

Контроль разницы токов реализован на основе сравнения интегрального заряда каждого импульса тока пучка, что повышает точность измерений в случае работы с импульсами тока сложной формы. Пользователю предоставлено на выбор несколько дискретных значений измеряемой разницы сигналов ИДТ: от 1% для номинального режима работы до 10% в случае перестройки рабочего режима ускорителя и проведения настроечных процедур. Для предотвращения ложных блокировок от различных помех формирование итогового аварийного сигнала происходит после трех последовательных срабатываний схемы сравнения на частоте следования импульсов тока пучка.

Пример представленной системы успешно используют на линейном ускорителе ионов водорода ИЯИ РАН в качестве одной из основных быстрых аварийных блокировок благодаря тому, что формируемый аварийный импульс передается на чоппер — устройство прореживания и блокировки импульсов тока пучка на входе в ускоритель.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа поддержана Министерством науки и высшего образования Российской Федерации в рамках работ по Договору № 075-15-2021-1358 от 12 октября 2021 года.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют, что не имеют конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Kropachev G., Kulevoy T., Sitnikov A.* // J. Surf. Invest.: X-ray, Synchrotron Neutron Tech. 2019. V. 13. № 6. P. 1126.
<https://www.doi.org/10.1134/S1027451019060399>
2. *Gavrilov S., Titov I.* // J. Surf. Invest.: X-ray, Synchrotron Neutron Tech. 2023. V. 17. № 4. P. 782.
<https://www.doi.org/10.1134/S1027451023040055>

3. ЦКП “Ускорительный центр нейтронных исследований структуры вещества и ядерной медицины” (2016). ИЯИ РАН, Россия.
<https://www.inr.ru/ckp-new>. Дата посещения: 10.06.2024.
4. *Forck P.* Lecture notes on beam instrumentation and diagnostics. // JUAS, 2017.
5. *Blokland W.* Beam current monitors. // Proc. USPAS, 2009.
6. Bergoz — Beam Instrumentation and High-Precision Instrument (2024). Bergoz Instrumentation, Франция.
<https://www.bergoz.com>. Дата посещения: 10.06.2024.
7. Ferrite cores manufacturer and supplier — Cosmo Ferrites (2024). Cosmo Ferrites Limited.
<https://www.cosmoferrites.com>. Дата посещения: 10.06.2024.
8. *Barnes M., Ducimetiere L.* // Ferrite materials for in-vacuum instruments. 2021. /Proceedings of ARIES workshop “Materials and engineering technologies for particle accelerator beam diagnostics instruments”.
9. *Bayle H., Delferrière O., Gobin R., Harrault F., Marroncle J., Senée F., Simon C., Tuske O.* // Rev. Sci. Instrum. 2014. V. 85. P. 02A713.
<https://www.doi.org/10.1063/1.4829736>
10. *Jung W.* Op Amp applications handbook. Elsevier, 2005. 896 p. ISBN 0-7506-7844-5

AN EMERGENCY BEAM LOSS MONITORING SYSTEM BASED ON BEAM CURRENT TRANSFORMERS FOR THE LINEAR ACCELERATOR OF THE DARIA PROJECT

S. A. Gavrilov^{1, 2, *}, V. A. Gaydash¹, A. I. Titov^{1, 2}

¹*Institute for nuclear research, Russian Academy of Sciences, Moscow, 117312 Russia*

²*Moscow institute of physics and technology, Dolgoprudny, 141700 Russia*

*e-mail: s.gavrilov@inr.ru

Beam loss control is one of the critical tasks during the operation of high-intensity charged particle accelerators. The paper presents the concept of a non-destructive beam loss monitoring system based on beam current transformers for a linear resonance proton accelerator of the DARIA compact neutron source. Features of the practical implementation and operation of the proposed beam current transformers based on ferrite cores and the necessary preamplifier electronics using transimpedance amplifiers are considered. Particular attention is paid to the method of monitoring the difference of the measured beam currents between two successive detectors and the principles of generating an alarm signal for the implementation of a fast emergency protection system for the accelerator. Control of the current difference is implemented on the fast integration and mutual comparison of the beam pulses charge passing through the detectors, that increases the accuracy of measurements, while it is possible to select several discrete values of the measured difference: for the nominal operating mode and the accelerator tuning procedure, when beam losses can increase significantly. The system works at any beam pulse repetition rate, and to prevent false block from possible interferences, the final alarm signal is generated as the sum of three consecutive signals of the comparison circuit at the beam pulse repetition rate.

Keywords: high-current accelerator, proton linear accelerator, beam instrumentation system, non-destructive diagnostics, beam current transformer, preamplifier electronics, transimpedance amplifier, beam loss, beam current difference control.