



НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР
«КУРЧАТОВСКИЙ ИНСТИТУТ»
ИНСТИТУТ ФИЗИКИ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ

ИФВЭ 2015–7

В.Д. Рудько, А.В. Максимов, Ю.С. Федотов, А.А. Логинов,
В.Д. Раев, С.В. Авраменко, М.П. Овсиенко

**Многооборотный быстрый вывод протонного пучка
из синхротрона У-70**

Направлено в *ИТЭ*

Протвино 2015

Аннотация

Рудько В.Д., Максимов А.В., Федотов Ю.С. и др. Многооборотный быстрый вывод протонного пучка из синхротрона У-70: Препринт ИФВЭ 2015-7. – Протвино, 2015. – 16 с., 14 рис., библиогр.: 3.

Дано описание новой системы вывода пучка высокой энергии из протонного синхротрона У-70 во внешний канал транспортировки – многооборотного быстрого вывода (МБВ, “вывод бритьем”). Наведение пучка на первое выводное устройство – электростатический дефлектор ЭД-106 – производится быстрыми дипольными бамп-магнитами с временем нарастания поля от 50 до 100 мкс (от 10 до 20 оборотов пучка). Описывается техническая реализация быстрых бамп-магнитов и их системы питания. Приведены первые экспериментальные результаты, полученные при опытной эксплуатации системы МБВ в 2014 году и показывающие, что характеристики выведенного пучка близки к стандартным для имеющейся системы однооборотного быстрого вывода.

Abstract

Rudko V.D., Maximov A.V., Fedotov Yu.S. et al. The multi-turn fast extraction of the proton beam from the U-70 synchrotron: IHEP Preprint 2015-7. – Protvino, 2015. – 16 p., figs.14, refs.: 3.

A novel high-energy beam extraction system from the U-70 proton synchrotron to external beam transfer line – that of a multi-turn fast extraction (MFE, via “beam shaving”) - is described. The beam is forced into the first upstream ejection device – an electrostatic deflector ESD-106 – with the fast dipole bump-magnets with the field rise time of 50 – 100 μ sec (equivalent of 10 – 20 beam turns around orbit). Technical implementation of the fast bump-magnets and their power supplies is presented. First experimental results acquired during commissioning of the MFE-system in 2014 are given. These indicate that the extracted beam parameters are close to those obtained in course of applying a conventional fast-extracting system already available.

Введение

Быстрый (однооборотный) вывод ускоренного пучка протонов из синхротрона У-70 во внешний канал транспортировки (КТ) производится системой вывода, включающей в себя кикер-магнит КМ-16, расположенный в 16 прямолинейном промежутке (ПП16) магнитной структуры, и выводных септум-магнитов ОМ-62 и ОМ-64, расположенных в ПП62 и ПП64 соответственно [1]. Максимальная длительность такого вывода составляет 5 мкс, что соответствует времени одного оборота пучка по орбите. При просвечивании динамических объектов с быстро протекающими процессами в установке для протонной радиографии [2] желательно иметь длительность экспозиции в диапазоне 20–50 мкс. Это позволяет достичь новая система многооборотного быстрого вывода (МБВ) – вывод «бритьём».

Вывод «бритьём». Обоснование метода

Общие принципы

Обычный однооборотный быстрый вывод даёт возможность получить длительность импульса вывода не более 5 мкс с последовательностью 29 сгустков протонов (банчей) длительностью 10–20 нс каждый, разделённых интервалом 160 нс. Возможна организация вывода ускоренного протонного пучка длительностью более одного оборота. Такой вывод осуществляется быстрым перемещением пучка в радиальном направлении в зазор выводного устройства, имеющего очень тонкую перегородку. При включенном ВЧ-ускоряющем поле сохраняется внутренняя азимутальная структура выведенного сгруппированного пучка. Далее пучок, отклонённый в первом устройстве, забрасывается в последовательность выводных устройств, имеющих более толстые перегородки и более сильные отклоняющие поля. Последнее в таком ряду устройство должно выводить пучок за пределы вакуумной камеры ускорителя. Обычно первым выводным элементом является электростатический дефлектор, имеющий перегородку из проволочек толщиной 0.08–0.10 мм и работающий при напряженности электрического поля более 70 кВ/см. Так как отклонение в электростатическом дефлекторе небольшое, то перегородка второго выводного устройства должна быть достаточно тонкой, а, следовательно, его сила не может быть большой. Силы второго устройства

должно хватать для переброса пучка через толстые перегородки последующих (оконечных) выводных устройств.

Оборудование, находящееся в эксплуатации

В ускорителе У-70 имеется электростатический дефлектор длиной 3 м с полем 70 кВ/см, расположенный в ПП106 (ЭД-106). Он используется в качестве первого выводного устройства действующей системы медленного резонансного вывода ускоренного протонного пучка. Пучок, заброшенный с помощью резонансной раскачки в зазор дефлектора, получает в нём отклонение на угол 0.3 мрад при энергии 70 ГэВ. Этого достаточно для переброса пучка через токовую перегородку эффективной толщиной 2.4 мм второго выводного устройства системы медленного вывода – отклоняющего магнита ОМ-24. Далее пучок забрасывается в зазор следующего магнита – ОМ-26, который выводит его за пределы вакуумной камеры ускорителя.

Новый вывод - МБВ

Наведение ускоренного протонного пучка на электростатический дефлектор можно осуществить с помощью быстрого локального горизонтального искажения замкнутой орбиты (бампа), возбуждаемого дипольными магнитами (бамп-магнитами - БМ), расположенными вокруг ПП106 в промежутках ПП 96 и ПП108.

Диаметр ускоренного пучка в ПП106 составляет ~15 мм. Выберем величину смещения $\Delta r_{106} = 20$ мм. Тогда, при значении коэффициента передачи “угол — координата” от ПП96 до ПП106, равном 25 м, угол α , получаемый пучком после прохождения бамп-магнита, должен быть равен 0.8 мрад. Для определения параметров бамп-магнита воспользуемся известной формулой:

$$BL=3.33\rho\alpha,$$

где B — индукция магнитного поля в зазоре магнита, Тл;

L — длина магнита, м;

ρ — импульс частиц ускоренного пучка, ГэВ/с;

α — угловое отклонение, рад.

При эффективной длине бамп-магнита 1.2 м величина магнитного поля при энергии 70 ГэВ составит 0.16 Тл. Такой магнит со временем нарастания поля от 50 до 100 мкс (10 – 20 оборотов) легко реализуем на практике.

Отклоненный электростатическим дефлектором ЭД-106 пучок попадает в зазор отклоняющего септум-магнита ОМ-24, который забрасывает его в цепочку магнитов ОМ-62, ОМ-64-1 и ОМ-64-2. В результате полученного отклонения пучок выводится за пределы вакуумной камеры ускорителя в ПП66, начало КТ.

Схема расположения оборудования системы МБВ на синхротроне У-70 приведена на рис. 1. В таблице 1 даны некоторые параметры выводных устройств.

На рис. 2 показана трасса вывода пучка, а на рис. 3 - гистограмма выведенного пучка по оборотам, полученная расчётным путём.

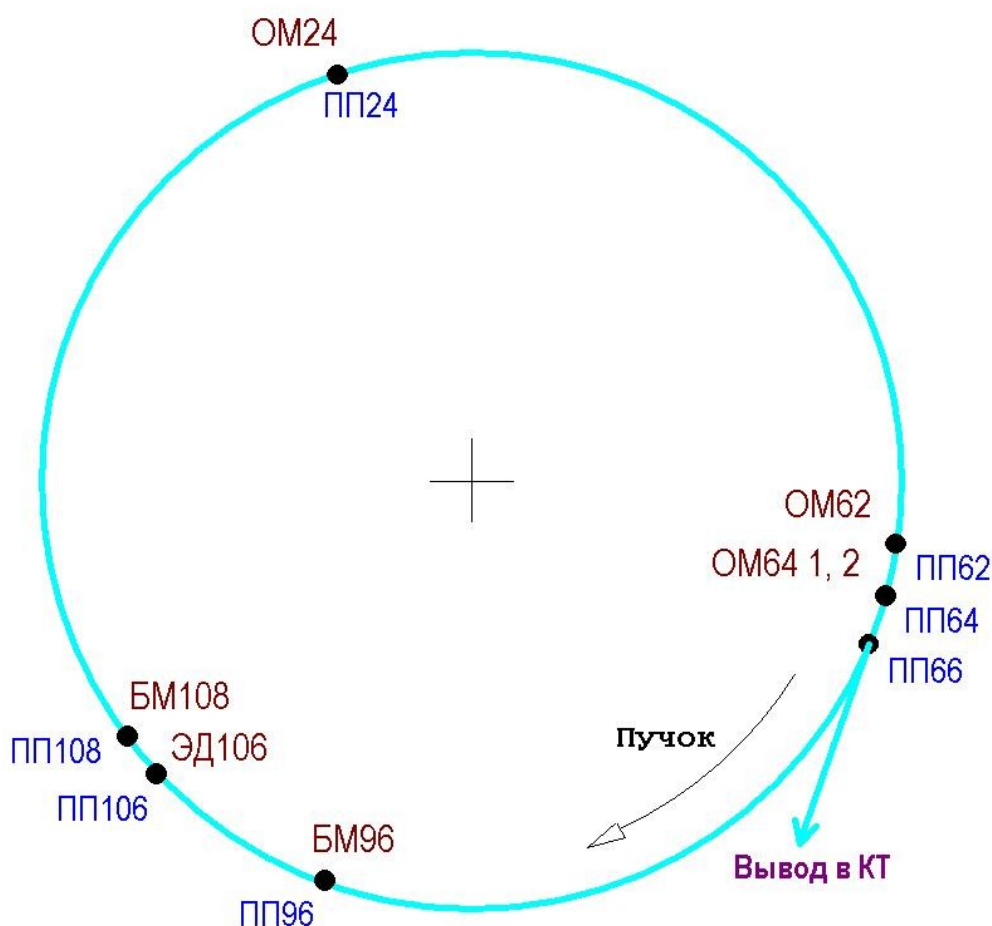


Рис. 1. Схема расположения оборудования системы МБВ.

Таблица 1. Параметры выводных устройств системы МБВ

Элемент	Длина, м	Толщина септума, мм	Угол отклон. пучка, мрад	Примечание
БМ-96, 108	1.2	-	0.8	Вновь созданные
ЭД-106	3.0	0.1	0.3	имеющийся
ОМ-24	2.6	2.4	1.6	имеющийся
ОМ-62	1.3	4	1.7	имеющийся
ОМ-64-1,2	2.6	4	9.4	имеющийся

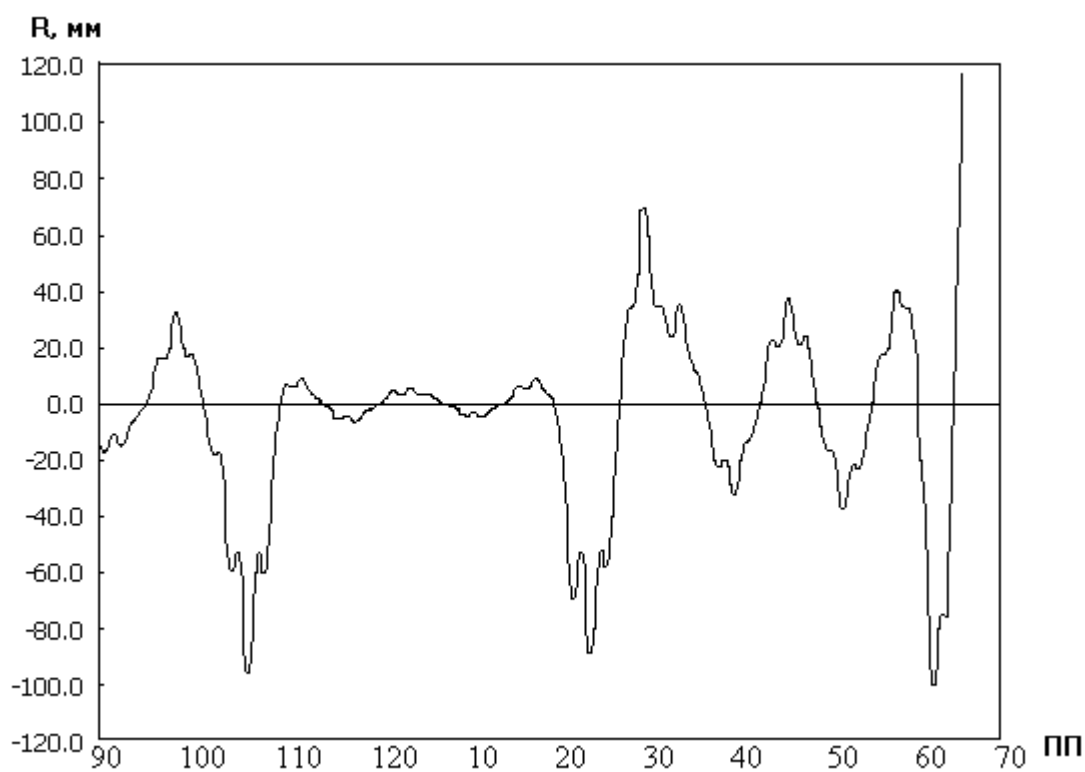


Рис. 2. Трасса вывода пучка системой МБВ от ПП106 до ПП66.

Вновь созданная система быстрых бамп-магнитов включает в себя:

- 1) два бамп-магнита;
- 2) систему их питания, состоящую из импульсного генератора и зарядного устройства;
- 3) кабельную линию для передачи импульса тока.

Далее приводится описание оборудования.

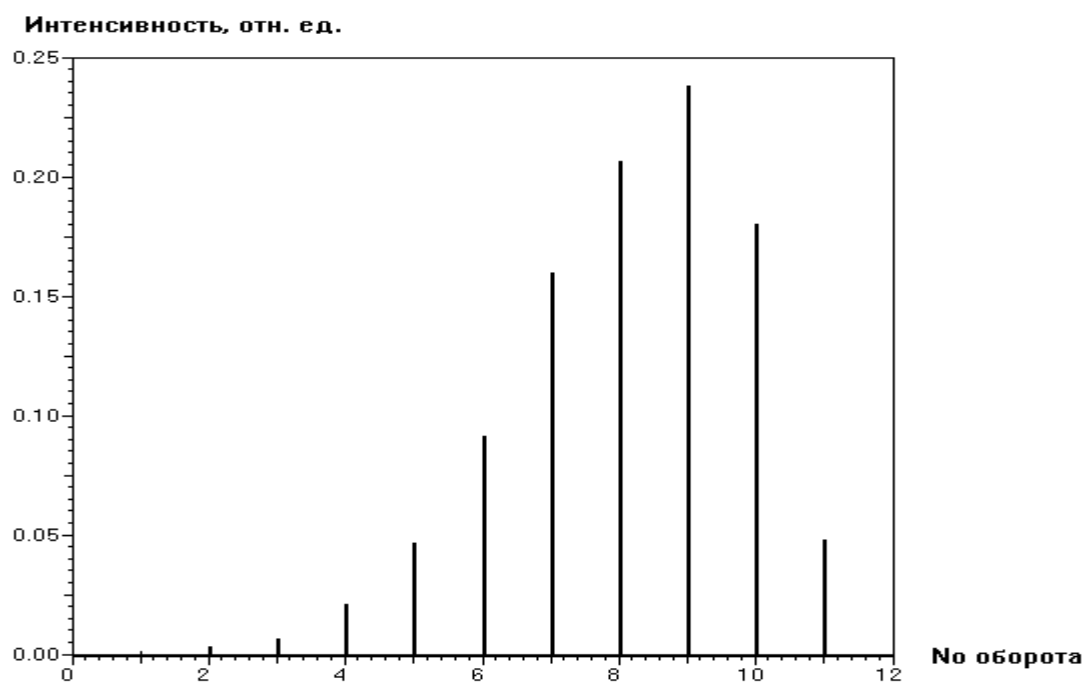


Рис.3. Гистограмма интенсивности выведенного пучка по оборотам.

Быстрые бамп-магниты

Магниты расположены в ПП96 и 108. Основные технические требования к магнитам изложены в таблице 2.

Таблица 2. Технические требования к бамп-магнитам

№ п/п	Параметры	Един. измер.	Требуемое значение
1	Апертура для прохождения пучка	мм	вертикальная - 100 горизонтальная - 150
2	Интеграл магнитного поля	Тл·м	0.2
3	Скорость изменения интегрального поля	Тл·м/с	минимальная - 2000 максимальная - 4000
4	Длительность нарастающей части поля	мкс	минимальная - 50 максимальная - 100

5	Линейность нарастания поля	%	± 10
6	Неоднородность поля в апертуре магнита	%	± 5
7	Величина остаточного поля, не более	мТл	2

При проектировании и изготовлении был принят вариант магнита С-образной формы с внутренней керамической вакуумной камерой и токопроводящей экранирующей перегородкой [3] (рис. 4). Такой вариант дает возможность использовать шихтованный магнитопровод из обычной электротехнической стали, а также позволяет снизить импеданс связи с пучком.

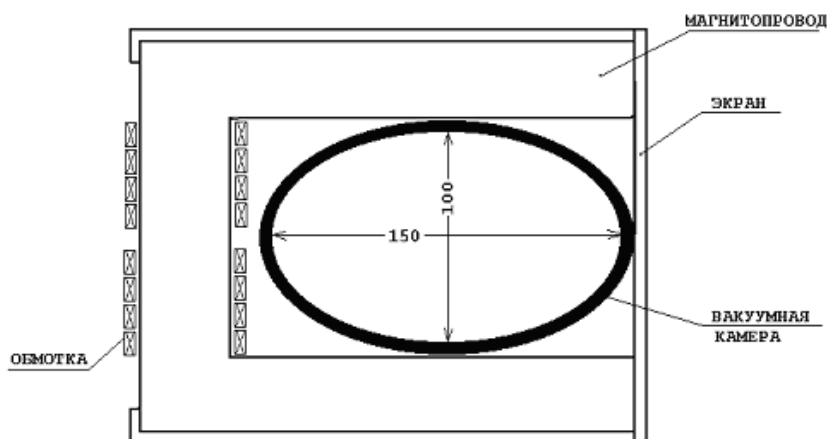


Рис. 4. Поперечное сечение бамп-магнита.

Всего было изготовлено 2 магнита. Магнитопровод собран из листов электротехнической стали марки 3413 толщиной 0.35 мм, стянутых 4-мя шпильками. 8-витковая обмотка расположена на спинке магнитопровода. Она намотана из 3-х параллельных проводов марки ПСД сечением $10 \times 3 \text{ мм}^2$. Изоляция обмотки: стеклолента, пропитанная эпоксидным компаундом.

Керамические вакуумные камеры были изготовлены немецкой фирмой FRIATEC AG из вакуумплотной керамики FRIALIT F99.7. Внутренняя поверхность ке-

рамической камеры покрыта плёнкой титана толщиной ~ 5.0 мкм. Фотография камеры показана на рис. 5.

Для обеспечения требуемой однородности магнитного поля зазор магнита закрывается экранирующей перегородкой, изготовленной из алюминия толщиной 15 мм. С этой же целью магнитопровод охватывается 2 короткозамкнутыми витками из алюминиевых шин (на рис. 4 не показаны).



Рис. 5. Металлокерамическая вакуумная камера бамп-магнита.

Технические характеристики бамп-магнита приведены в таблице 3:

Таблица 3. Параметры магнитов

№п/п	Технические характеристики	Един. измер.	Значение
1	Рабочая область для пучка (верт. ·гориз)	мм	100×150
2	Зазор магнитопровода (верт. ·гориз)	мм	120×210

3	Эффективная длина магнита	м	1.2
4	Длина магнита по керамической камере	м	1.35
5	Максимальное рабочее магнитное поле	Тл	0.17
6	Индуктивность магнита	мкГн	169
7	Максимальный рабочий ток	А	2000
8	Амплитудное значение тока	А	4200
9	Величина остаточного поля в зазоре	мТл	0.15
10	Режим работы		импульсный

Фотография бамп-магнита без вакуумной камеры показана на рис. 6.



Рис. 6. Общий вид магнита без камеры.

Фотография бамп-магнита, установленного в ПП108 У-70, вместе с вакуумной камерой и промежуточными сильфонами приведена на рис. 7.

Система питания

Источник питания бамп-магнитов включает в себя импульсный генератор и зарядное устройство. Структурная схема источника показана на рис. 8. Импульсный генератор является основным элементом системы, в нём происходит накопление энергии

и формирование импульсов тока с требуемыми параметрами. Главными составляющими генератора являются: высоковольтный трансформатор-выпрямитель, накопитель энергии (конденсаторная батарея) и ключевая сборка

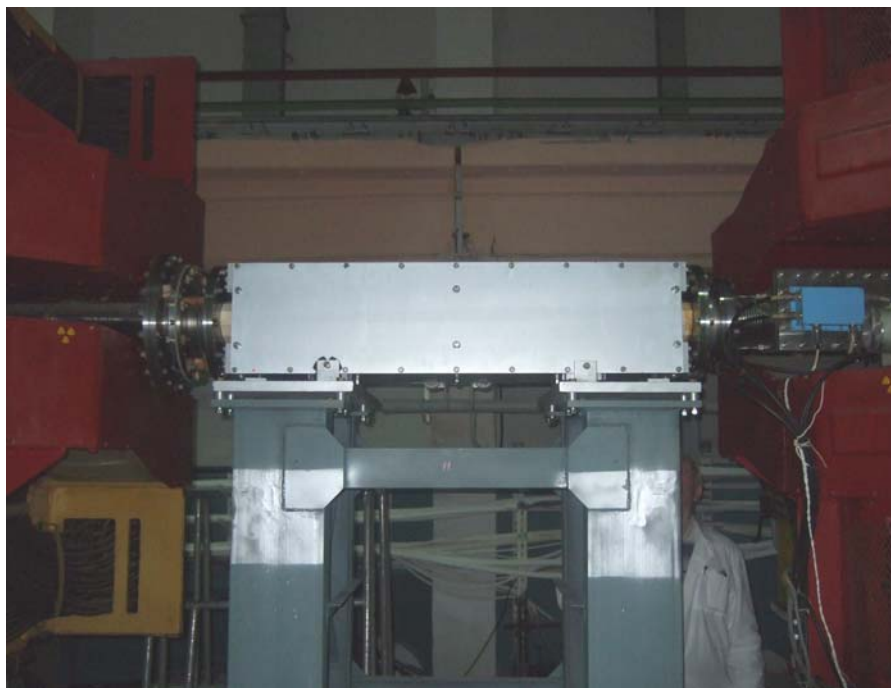


Рис. 7. Общий вид бамп-магнита в ПП108 У-70.

Для системы питания бамп-магнитов выбрана наиболее простая и экономичная схема генератора с тиристорной ключевой сборкой и диодным замыкателем нагрузки (кроубар). При этом форма напряжения на конденсаторах батареи близка к апериодической, что облегчает условия работы изоляции конденсаторов и увеличивает срок их службы. Импульсный генератор имеет две батареи конденсаторов: ёмкостью 225 и 56 мкФ, которые подключаются при длительности наведения 100 и 50 мкс соответственно. Фотография импульсного генератора бамп-магнитов приведена на рис. 9.

Зарядное устройство, состоящее из двух блоков – блока тиристорного регулятора и блока регулирования и защиты, изготовлено по образцу зарядных устройств систем питания импульсных магнитооптических элементов КТ. Технические характеристики приведены в таблице 4.

Таблица 4. Технические характеристики системы питания бамп-магнитов

№ п/п	Наименование параметра	Ед. измерения	Значение параметра	
			Длит. наведения 100 мкс	Длит. наведения 50 мкс
1	Макс. зарядное напряжение	В	4000	8000
2	Макс. рабочий ток	А	2000	2000
3	Амплитуда тока разряда	А	4200	4200
4	Емкость батареи	мкФ	225	56
5	Скорость нарастания тока	А/мкс	20	40
6	Макс. зарядный ток	А	0.25	0.25

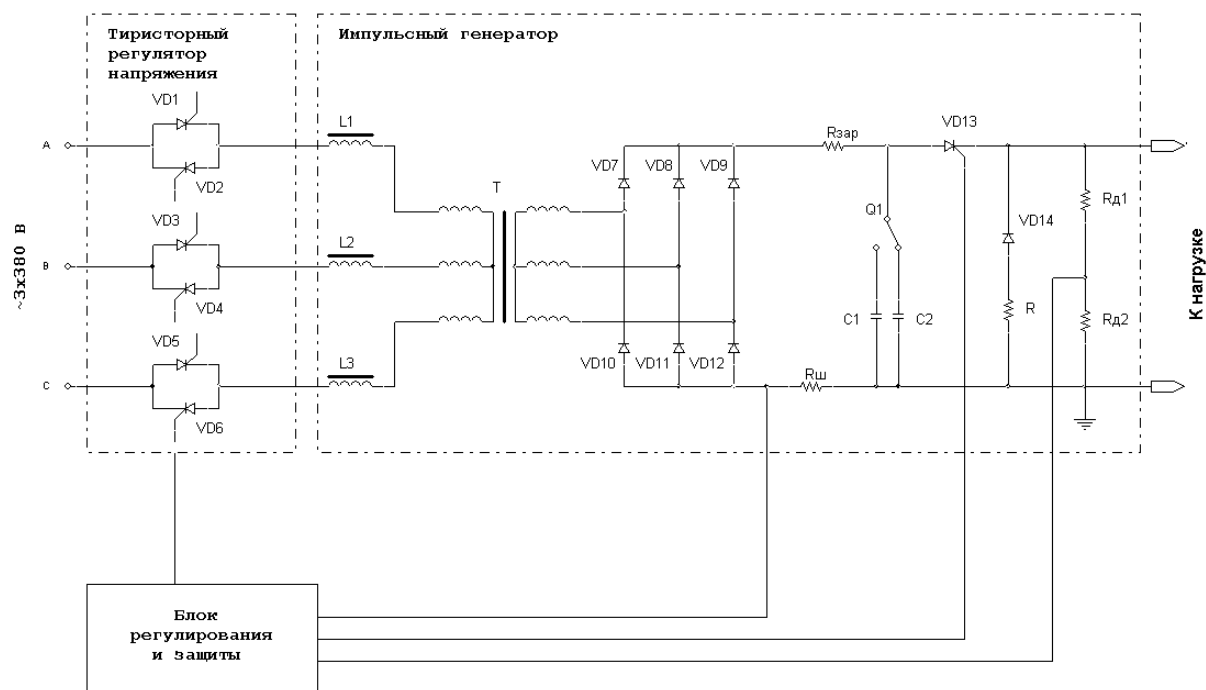


Рис. 8. Структурная схема источника питания бамп-магнитов.

L1÷L3 – токоограничивающие дроссели; T - высоковольтный трансформатор; VD7 ÷ VD12 – выпрямитель; VD13 – тиристорный ключ; C1,C2 - батареи конденсаторов; VD14, R – схема «кроубар»; Rзар.- зарядный резистор; Rш — резистор для измерения тока; Rd1,Rd2 — делитель напряжения.

На рис. 10 приведены осциллограммы импульсов поля магнита (луч 1, измерительная петля) и тока генератора (луч 2, датчик тока LEM(2B/1кА)). Из осциллограмм видно, что скорость нарастания тока (поля) в рабочем диапазоне наведения от 0 до 100 мкс практически постоянна и находится в требуемых пределах $\pm 10\%$.



Рис. 9. Общий вид импульсного генератора бамп-магнита.

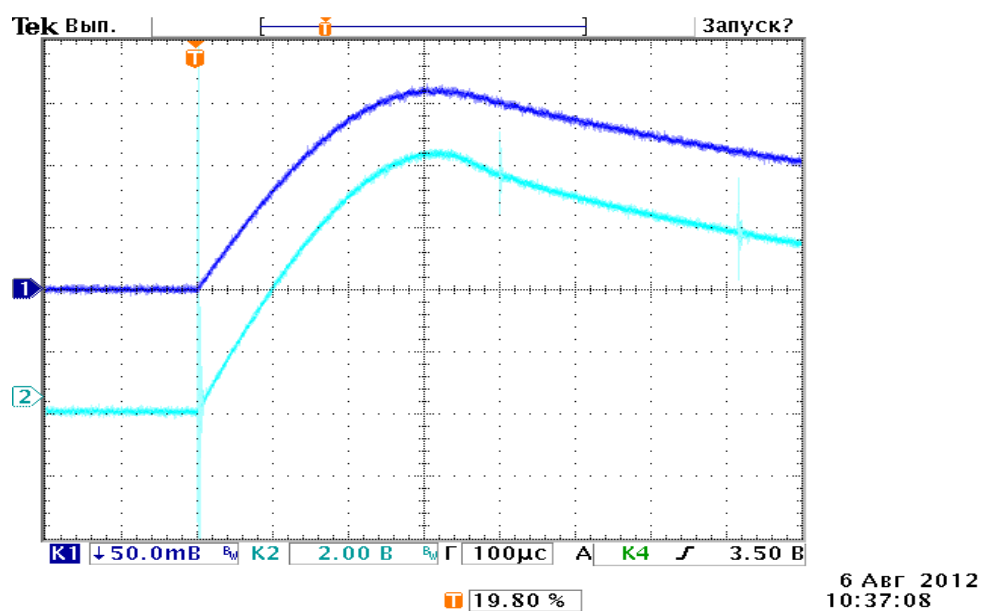


Рис. 10. Осциллограммы импульсов магнитного поля и тока генератора.

Системы питания расположены в здании 1003 технической площадки ИФВЭ на расстоянии более 500 м от бамп-магнитов. Для передачи импульсных токов от генераторов к магнитам используется специализированный высоковольтный кабель КПВ-1/50 (12 параллельных ниток на магнит). Кабель предназначен для передачи импульсных токов частотой $20 \div 100$ кГц с максимальной амплитудой напряжения 50 кВ. Он изготовлен на заводе ОАО «Севкабель» по новой технологии с применением в качестве изоляции сшитого полиэтилена. Такие кабели отличаются высокой надёжностью, устойчивостью к внешним воздействиям и повышенной пропускной способностью по току.

Модернизация системы питания септум-магнитов ОМ-62, ОМ-64

Для эффективного вывода пучка из ускорителя У-70 в КТ к системам питания импульсных магнитооптических элементов предъявляется требование на однородность вершины импульса тока в магнитах $\pm 0.1\%$. При многооборотном быстром выводе длительностью 20 оборотов (100 мкс) этому требованию удовлетворяют все системы питания, кроме систем питания выводных септум-магнитов ОМ-62 и ОМ-64. Поэтому параллельно с работами по проекту МБВ проводилась работа по увеличению плоской части вершины импульса септум-магнитов. Был выбран наименее затратный способ решения этой задачи. В разрядную цепь “генератор – магнит” был введён дополнительный контур RLC, настроенный на 7-ю гармонику основной частоты разрядной цепи. Результат проделанной работы иллюстрируется рис. 11. Предъявленные требования были выполнены.

Экспериментальные результаты

Система введена в опытную эксплуатацию в 2014 году. При просвечивании динамических объектов с быстропротекающими процессами желательно иметь длительность экспозиции в диапазоне 20–50 мкс. На рис. 12 приведена осциллограмма пяти-оборотного вывода в КТ девяти сгустков протонов (сигнал с индукционного датчика

тока - пояса Роговского). Полная длительность вывода составляет 25 мкс. На рис. 13 приведена осциллограмма сигнала токового детектора, выполненного на основе трансформатора тока, пятиоборотного вывода пяти сгустков. На верхней осциллограмме – сигнал ускоренного пучка в ускорителе, на нижней – сигнал выведенного пучка в КТ.

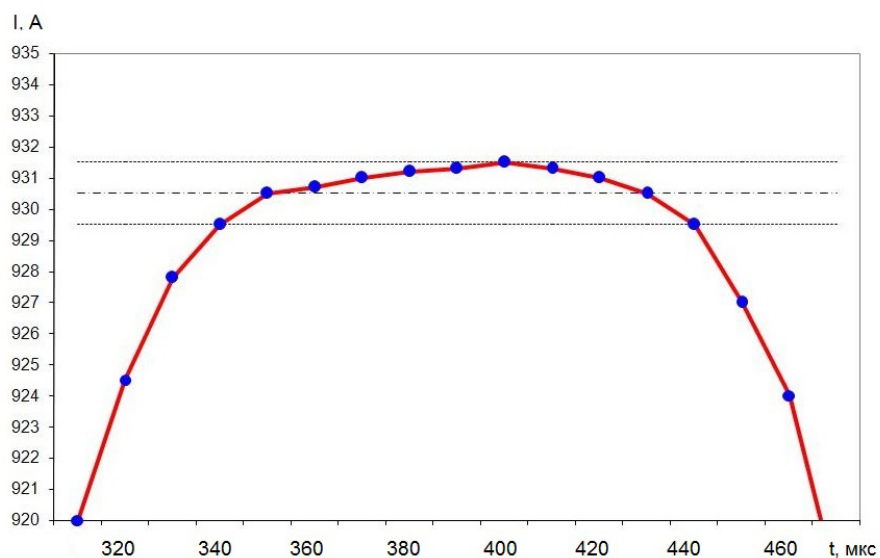


Рис. 11 . Форма вершины импульса тока в магните ОМ64-2. Штриховыми линиями обозначены верхняя и нижняя границы допусков $\pm 0,1\%$.

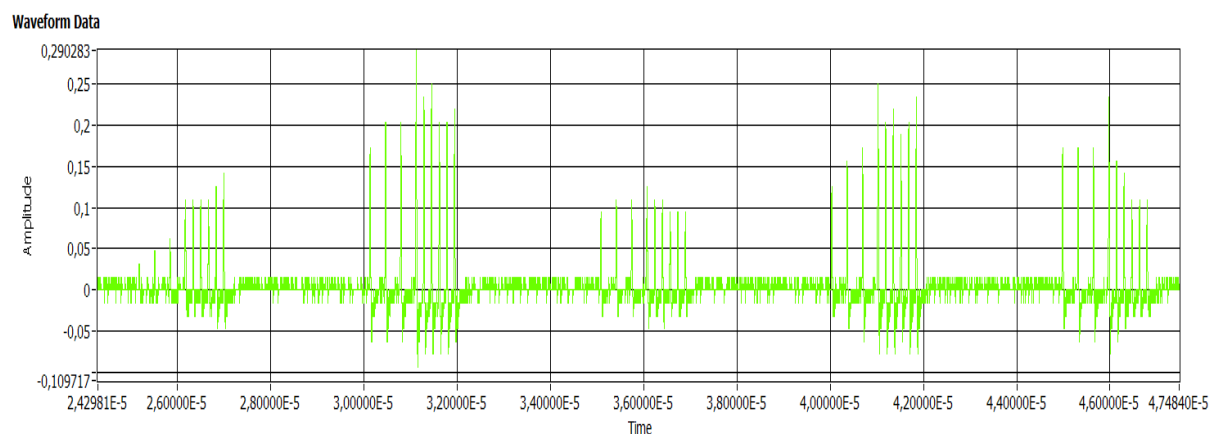


Рис. 12. Осциллограмма сигнала с пояса Роговского.



Рис. 13. Осциллограмма сигнала с трансформатора тока пятиоборотного вывода пяти сгустков.

Изображения профилей на профилометрах протонного радиографического комплекса [2] при многооборотном выводе приведены на рис. 14.

Заключение

Первый этап исследований многооборотного быстрого вывода протонного пучка из синхротрона У-70 был проведен в ноябре 2014 года после ввода системы в опытную эксплуатацию. Система питания МБВ сработала штатно. Получены ожидаемые результаты.

Сравнение двух режимов быстрого вывода — однооборотного и многооборотного — показало схожесть характеристик выведенного пучка, при том, что МБВ позволяет получать изображения быстропротекающих процессов с большим временем экспозиции.

Введение в эксплуатацию системы МБВ расширяет функциональные возможности ускорителя У-70 для прикладных исследований.

Авторы выражают искреннюю благодарность С.В. Иванову за полезные обсуждения и замечания при подготовке рукописи.

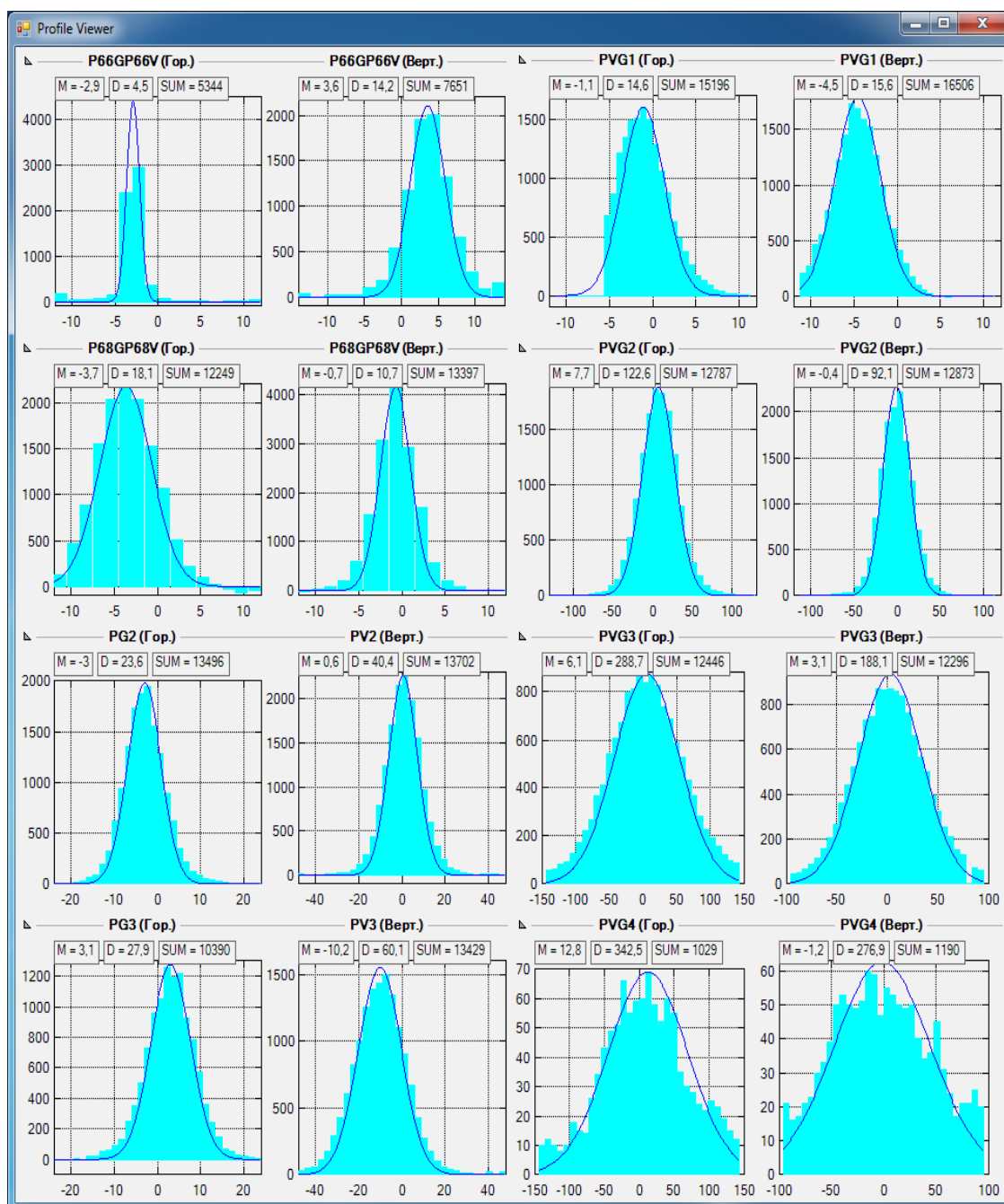


Рис. 14. Профили протонного пучка при многооборотном выводе

Список литературы

- [1] Баранов В.Т., Татаренко В.М., Федотов Ю.С. и др. Препринт ИФВЭ 92-118. Протвино, 1992.
- [2] Максимов А.В., Тюрин Н.Е., Федотов Ю.С. Оптическая система протонной облучательной установки на ускорителе У-70 ГНЦ ИФВЭ // ЖТФ, 2014. Т. 84, вып. 9, С. 132-138.
- [3] Андреев В.Н., Курнаев О.В., Рудько В.Д. Многовитковый импульсный септум-магнит с экранирующей перегородкой. Всесоюзное совещание по ускорителям заряженных частиц. Дубна, 1989. Т.1. С. 361.

Рукопись поступила 22 мая 2015 г.

В.Д. Рудько, А.В. Максимов, Ю.С. Федотов и др.

Многооборотный быстрый вывод протонного пучка из синхротрона У-70.

Препринт отпечатан с оригинала-макета, подготовленного авторами.

Подписано к печати	18.06.2015.	Формат	$60 \times 84/16$.	Цифровая печать.
--------------------	-------------	--------	---------------------	------------------

Печ.л.	1,25.	Уч.—изд.л.	1,72.	Тираж	80.	Заказ	10.	Индекс	3649.
--------	-------	------------	-------	-------	-----	-------	-----	--------	-------

ФГБУ ГНЦ ИФВЭ НИЦ «Курчатовский институт»

142281, Московская область, г. Протвино, пл. Науки, 1

www.ihep.ru; библиотека <http://web.ihep.su/library/pubs/all-w.htm>

Индекс 3649

ПРЕПРИНТ 2015-7,
ФГБУ ГНЦ ИФВЭ НИЦ «Курчатовский институт», 2015
