

ЭЛЕКТРОНИКА И
РАДИОТЕХНИКА

УДК 621.384.665+621.387.332

ГЕНЕРАТОРЫ ПИТАНИЯ УДАРНОГО МАГНИТА ДЛЯ ВЫПУСКА
ИОНОВ ИЗ БУСТЕРА В ТРАНСПОРТНЫЙ КАНАЛ НУКЛОТРОНА
УСКОРИТЕЛЬНОГО КОМПЛЕКСА NICA¹

© 2024 г. Д. А. Шведов^{а, *}, О. В. Анчугов^а, Д. И. Бажутов^а, А. А. Фатеев^б,
А. В. Тузиков^б

^аИнститут ядерной физики им. Г.И. Будкера

Сибирского отделения Российской академии наук

Россия, 630090, Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, 11

^бОбъединенный институт ядерных исследований

Россия, 141980, Дубна, Московская обл., ул. Жолио-Кюри, 6

*e-mail: D.A.Shvedov@inp.nsk.su

Поступила в редакцию 24.11.2023 г.

После доработки 26.04.2024 г.

Принята к публикации 06.05.2024 г.

Для питания быстрого ударного магнита (кикера) выпуска ионов из ускорителя-бустера в канал бустер-нуклотрон ускорительного комплекса NICA (ОИЯИ, г. Дубна) были разработаны, изготовлены и испытаны генераторы на основе псевдоискровых коммутаторов ТПИ1-10к/75. Выбор коммутатора был обусловлен уникальностью требований к параметрам выходного импульса и невозможностью использования твердотельных высоковольтных ключей из-за высокого радиоактивного фона в местах перепусков пучков на комплексе. Для обеспечения фронта длительностью 500 нс и ширины плато импульса 500 нс с целью снижения влияния индуктивности проводников магнита в 650 нГн было принято решение о его биполярном “встречном” питании. Благодаря этому были получены токи более 30 кА при зарядном напряжении формирующей линии до 50 кВ. В статье описаны схемы генераторов, приведены результаты их испытаний в ИЯФ СО РАН и непосредственно на рабочем месте на комплексе NICA.

Ключевые слова: ускоритель, коллайдер, накопительное кольцо, бустер-синхротрон, кикер, ударный магнит, импульс, тиратрон, длительность, наносекунда, микросекунда, фронт, срез, плато, однородность поля, магнитное поле, нагрузка, формирующая линия

1. ВВЕДЕНИЕ

¹ Материалы 28-й конференции по ускорителям заряженных частиц “RuPAC’23”, Новосибирск.

В ударных магнитах без ферромагнитных сердечников, в отличие от часто используемых ферритовых ударных магнитов с керамической вакуумной камерой, отклоняющее магнитное поле формируется посредством токнесущих проводников и проводящих экранов. Для ускорительного комплекса NICA (ОИЯИ, г. Дубна) был разработан подобный ударный магнит для выпуска ионов в канал, соединяющий бустер-синхротрон и экспериментальный ускоритель нуклотрон [1, 2]. Для получения необходимого значения магнитного поля 0.17–0.18 Тл в области выводимого пучка была применена несимметричная конструкция магнита без использования ферромагнитного сердечника.

2. ОСНОВНЫЕ ПАРАМЕТРЫ УДАРНОГО МАГНИТА ВЫВОДА ПУЧКА ИЗ БУСТЕРА КОМПЛЕКСА NICA

Подробное описание ударного магнита было дано статье [3]. Его основные параметры приведены в табл. 1.

Таблица 1. Основные параметры ударного магнита выпуска из бустера

Эффективная длина магнита, м	1.6
Максимальная жесткость выводимых частиц, Тл·м	25
Максимальное магнитное поле, Тл	0.18
Максимальный ток в электродах, кА	32
Неоднородность поля в области пучка	±1%
Диаметр рабочих электродов, мм	8

Ударный магнит представляет собой конструкцию, не содержащую ферромагнитного сердечника, которая состоит из одной пары проводников (рис. 1а), соединенных параллельно, и стального экрана с полукруглым сечением, имеющим плоскую стенку в районе выводимого пучка.

Рис. 1. Фотографии ударного магнита выпуска из бустера комплекса НИСА: **а** – внутренняя часть; **б** – общий вид в сборе с экранирующей стенкой и токовводами с защитными кожухами.

Полная индуктивность пары проводников составляет 650 нГн. В случае однополярного питания зарядное напряжение формирующих линий (ФЛ) превышает 100 кВ, что предполагает существенные трудности при создании импульсного генератора на таком напряжении. Для обеспечения необходимых параметров ударного магнита была выбрана схема питания пары электродов-проводников с помощью двух генераторов с разной полярностью токов выходных импульсов. На рабочие проводники импульсы подаются с противоположных концов через высоковольтные вводы, расположенные на плоской части экрана ударного магнита (см. рис. 1а). При таком подключении эффективная индуктивность ударного магнита снизилась в 2 раза, что позволило получить необходимую скорость нарастания фронта импульса и ширину рабочего “плато” при зарядном напряжении не более 50 кВ.

3. ОПИСАНИЕ ГЕНЕРАТОРОВ УДАРНОГО МАГНИТА

Общая схема питания ударного магнита приведена на рис. 2.

Рис. 2. Общая схема питания ударного магнита.

На рис. 3 представлена принципиальная схема генератора положительной полярности.

Рис. 3. Принципиальная схема генератора положительной полярности.

Оба генератора включают в себя накопительные ФЛ, каждая из которых состоит из отдельных высоковольтных малоиндуктивных конденсаторов на основе бумажно-пленочных секций, разработанных в ИЯФ совместно с заводом “НЗК” (Новосибирск), и катушек индуктивности. В качестве ключевого элемента используется тиратрон с холодным катодом типа ТПИ1-10К/75. Все элементы генераторов с выходными токовыводами, так же как и входные вводы ударного магнита, заполняются до вакуумной границы элегазом (SF_6) под избыточным давлением до 0.05 МПа для обеспечения электрической прочности конструкции.

Стационарный источник питания (ИП) типа “Spellman” заряжает формирующую линию с постоянным током до 50 кВ. При срабатывании ключа VL_1 в индуктивности ударного магнита начинает формироваться импульс тока длительностью равной двойной электрической длине ФЛ в 660 нс. Емкость трех конденсаторов ФЛ выбрана по 100 нФ, а конденсатор, ближайший к коммутатору, имеет увеличенную емкость 125 нФ для коррекции формы вершины выходного импульса. Так же в схему введена цепь поглощения отражений, следующих за основным выходным импульсом при работе на индуктивную нагрузку: R_2 – согласующая активная нагрузка величиной 1.25 Ом, равная волновому сопротивлению ФЛ; VD_1 – параллельно-последовательная диодная сборка.

Как следует из схемы, в генераторе с положительной полярностью тока (см. рис. 3) один полюс ФЛ заземлен, а другой через изолированный высоковольтный коммутатор подключается к ударному магниту. В генераторе отрицательной полярности (рис. 4) наоборот: один полюс ФЛ изолирован относительно земли через индуктивность ударного магнита, а другой подключается к тиратрону, у которого катод заземлен. Поэтому при запуске коммутатора в таком включении в нагрузке протекает ток отрицательной полярности.

Рис. 4. Принципиальная схема генератора отрицательной полярности (R_2 и VD_1 аналогичны генератору положительной полярности).

Основные параметры генераторов выпуска из бустера представлены в табл. 2.

Таблица 2. Основные параметры генераторов ударного магнита выпуска

Максимальный ток нагрузки, кА	37
Номинальный ток нагрузки, кА	32
Максимальное выходное напряжение, кВ	55
Ширина “плато” импульса на уровне $\pm 3\%$ от максимума амплитуды, нс	500
Длительность переднего фронта импульса, нс	500
Временной джиттер от импульса к импульсу, нс	± 5

На рис. 5 показана конструкция основных узлов генератора отрицательной полярности.

Рис. 5. Основные конструктивные узлы генератора отрицательной полярности: 1 – тиратронный коммутатор ТПИ1-10к/75; 2 – конденсаторы ФЛ; 3 – катушки индуктивности

ячеек ФЛ; 4 – диодная сборка; 5 – внутренняя согласующая нагрузка; 6 – шина земляная; 7 – токоведущая шина; 8 – пояс Роговского; 9 – газовая защитная мембрана; 10 – контрольный манометр; 11 – разъемы запуска и контроля рабочих параметров тиратрона; 12 – газовые вентили; 13 – газонаполненный бак; 14 – токовывод на ударный магнит.

На рис. 6 приведены осциллограммы импульсов с поясов Роговского (U_{I1} на схемах), снятые в канале бустер–нуклотрон при работе ударного магнита в номинальном режиме. Зарядное напряжение 47 кВ и амплитуда тока 32 кА.

Рис. 6. Выходные импульсы генераторов положительной и отрицательной полярности.

В настоящее время при невысокой интенсивности захвата ионов углерода допускается более пологий фронт импульса (более 500 нс). Ширина плато на вершине (см. рис. 6) на уровне примерно 3% от максимальной амплитуды несколько меньше, порядка 400 нс. Длительность переднего фронта импульса около 600 нс.

Для выпуска ионов с высокой интенсивностью, где требуются более жесткие требования к данным параметрам, были проведены работы по расширению “плато” импульса. На рис. 7 и рис. 8 приведены осциллограммы импульсов после корректирования индуктивностей звеньев ФЛ. На рис. 9 показаны фотографии генераторов в канале на своем рабочем месте. Было изменено количество витков катушек индуктивности ячеек и получена оптимальная форма вершины и фронта импульса: 500 нс на уровне 3% от максимальной амплитуды импульса. Длительность переднего фронта – 500 нс, что и требовалось в техническом задании. Также проводились работы по экранированию контрольных цепей поясов Роговского с целью снижения влияния высоковольтных наводок на эти цепи для получения адекватной формы импульса.

Рис. 7. Осциллограмма импульса после корректирования катушек индуктивности.

Временной масштаб по горизонтальной оси равен 250 нс/дел.

Рис. 8. Осциллограмма импульса после корректирования катушек индуктивности. Временной масштаб по горизонтальной оси 100 нс/дел.

Рис. 9. Генераторы, подключенные к ударному магниту, на своем рабочем месте в канале бустер–нуклотрон комплекса NICA.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящее время генераторы включены в работу на комплексе NICA для выпуска пучка ионов из бустера в транспортный канал нуклотрона, а также один генератор с отрицательной полярностью временно питает сразу две секции инжекционного ударного магнита. Они вполне обеспечивают управление пучками на впуске и выпуске указанных выше ускорителей, что позволяет использовать аналогичные устройства и далее для инъекции ионных пучков как в строящемся коллайдере NICA, так и в других подобных установках.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Alexandrov V.S., Gorbachev E.V., Tuzikov A.V., Fateev A.A.* // Phys. of Particles and Nuclei Letters. 2012. V. 9. Iss. 4. P. 425.
<https://doi.org/10.1134/S1547477112040073>
2. *Trubnikov G., Agapov N., Brovko O., Butenko A., Donets E., Eliseev A., Fimushkin V., Gorbachev E., Govorov A., Ivanov E., Karpinsky V., Kekelidze V., Khodzhbagiyani H., Kovalenko A., Kozlov O. et al.* // Proc. of 4th International Particle Accelerator Conference IPAC'13. Shanghai, China. 2013. P. 1343.
3. *Анчугов О.В., Шведов Д.А., Киселев В.А., Журавлев А.Н., Сняткин С.В., Бажутов Д.И., Тузииков А.В., Фатеев А.А., Петухов А.С.* // ПТЭ. 2022. № 3. С. 100.
<https://doi.org/10.31857/S0032816222040024>

ПОДПИСИ К РИСУНКАМ

Рис. 1. Фотографии ударного магнита выпуска из бустера комплекса NICA: **а** – внутренняя часть; **б** – общий вид в сборе с экранирующей стенкой и тоководами с защитными кожухами.

Рис. 2. Общая схема питания ударного магнита.

Рис. 3. Принципиальная схема генератора положительной полярности.

Рис. 4. Принципиальная схема генератора отрицательной полярности (R_2 и VD_1 аналогичны генератору положительной полярности).

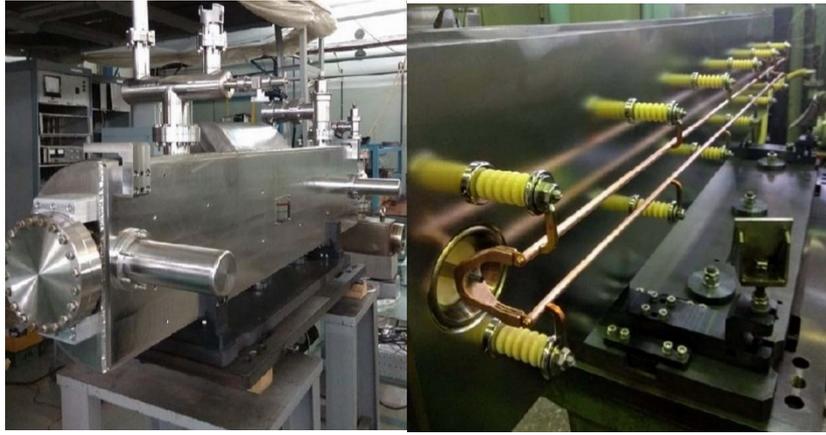
Рис. 5. Основные конструктивные узлы генератора отрицательной полярности: *1* – тиратронный коммутатор ТПИ1- 10к/75; *2* – конденсаторы ФЛ; *3* – катушки индуктивности ячеек ФЛ; *4* – диодная сборка; *5* – внутренняя согласующая нагрузка; *6* – шина земляная; *7* – токоведущая шина; *8* – пояс Роговского; *9* – газовая защитная мембрана; *10* – контрольный манометр; *11* – разъемы запуска и контроля рабочих параметров тиратрона; *12* – газовые вентили; *13* – газонаполненный бак; *14* – токовывод на ударный магнит.

Рис. 6. Выходные импульсы генераторов с положительной и отрицательной полярностью.

Рис. 7. Осциллограмма импульса после корректирования катушек индуктивности. Временной масштаб по горизонтальной оси 250 нс/дел.

Рис. 8. Осциллограмма импульса после корректирования катушек индуктивности. Временной масштаб по горизонтальной оси 100 нс/дел.

Рис. 9. Генераторы, подключенные к ударному магниту, на своем рабочем месте в канале бустер–нуклотрон комплекса NICA.



a)

б)

Рис. 1

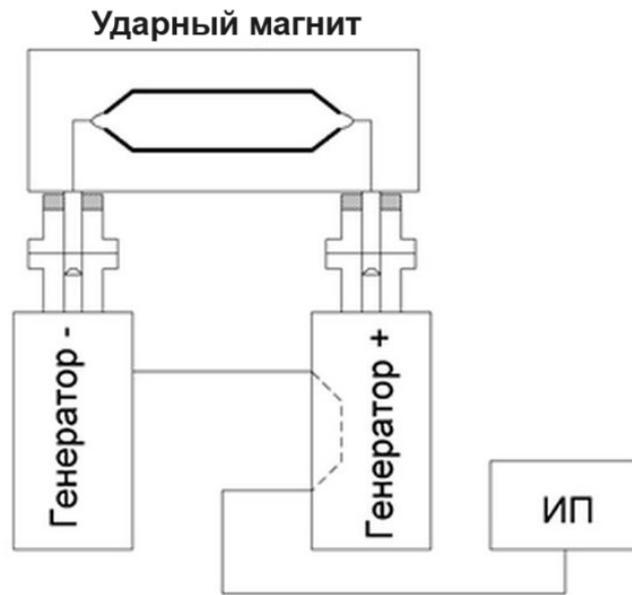


Рис. 2

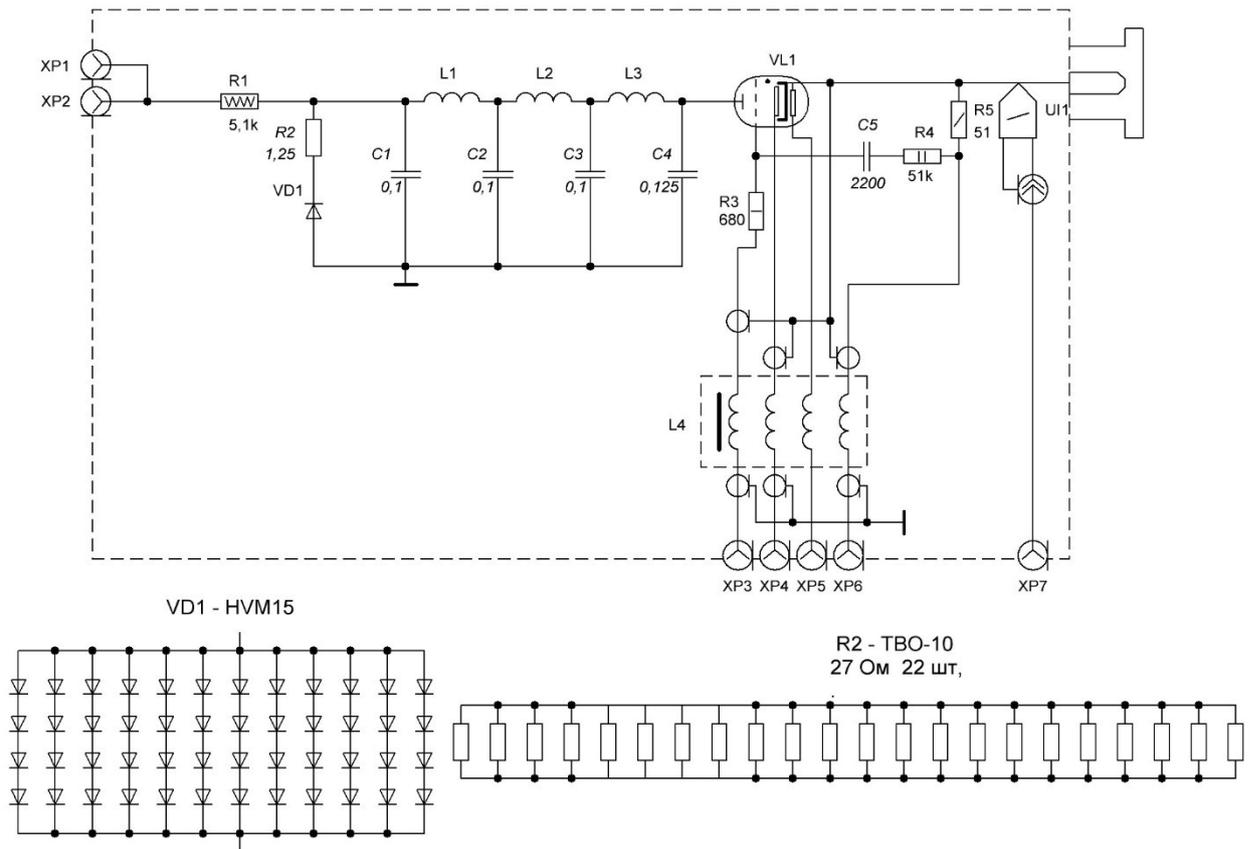


Рис. 3

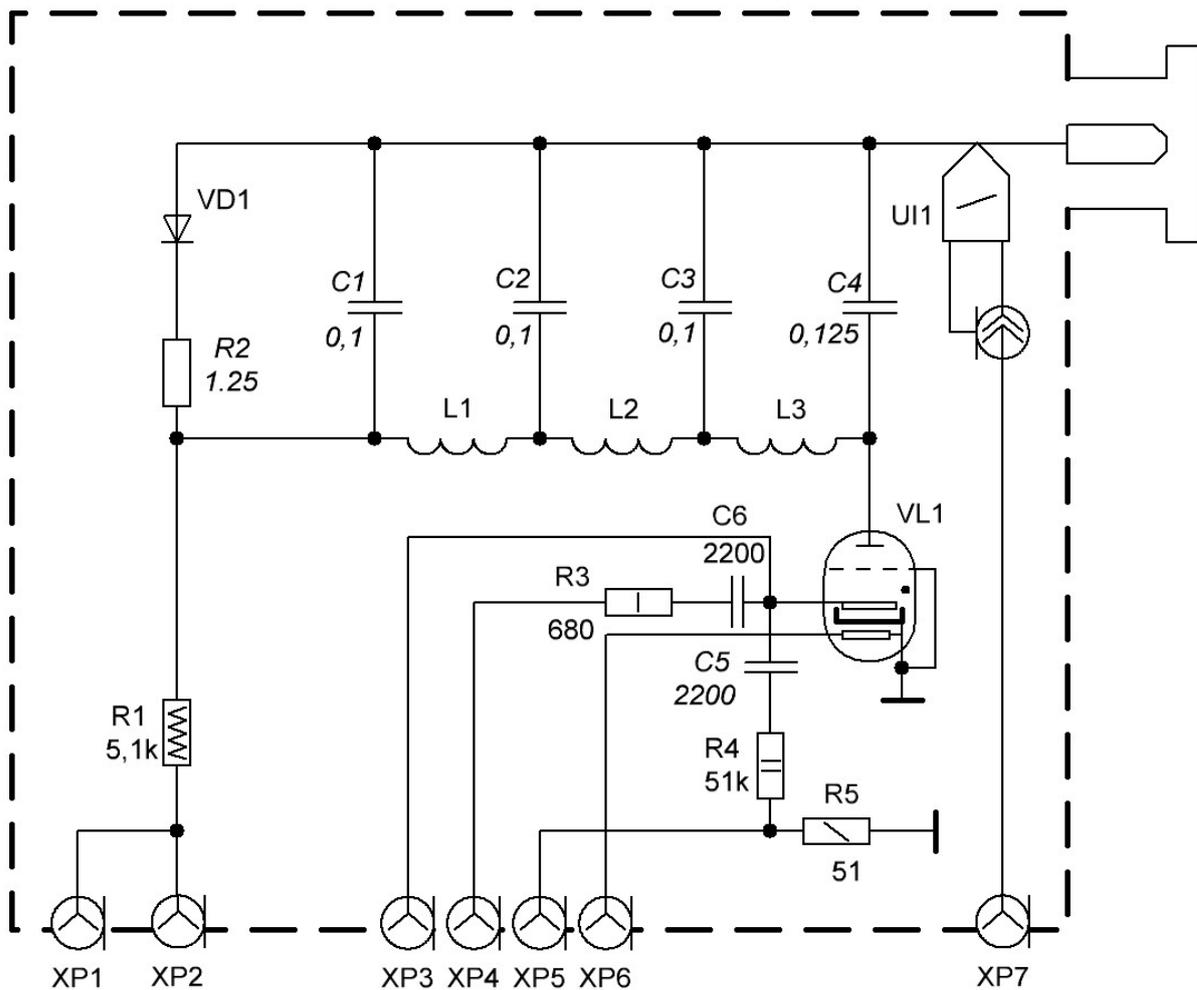


Рис. 4

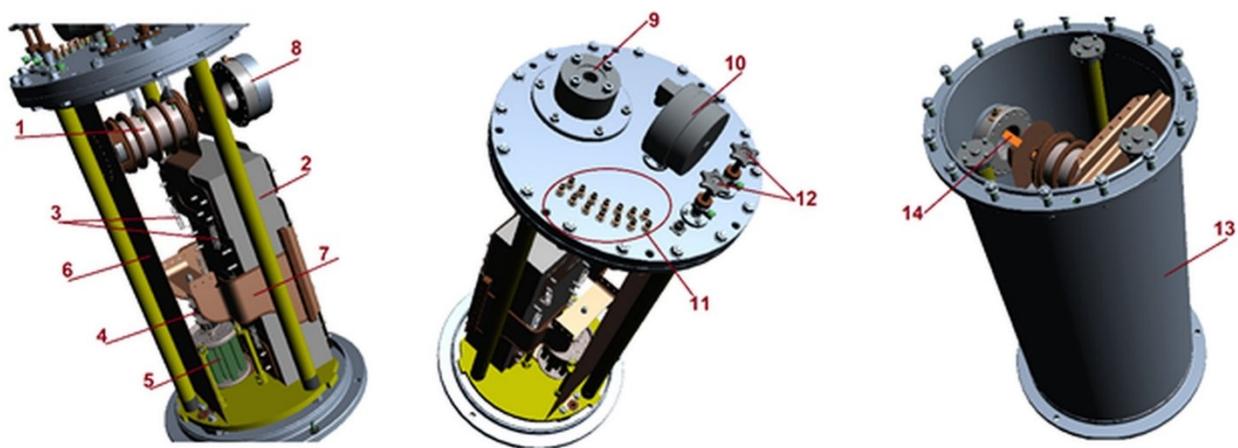


Рис. 5



Рис. 6

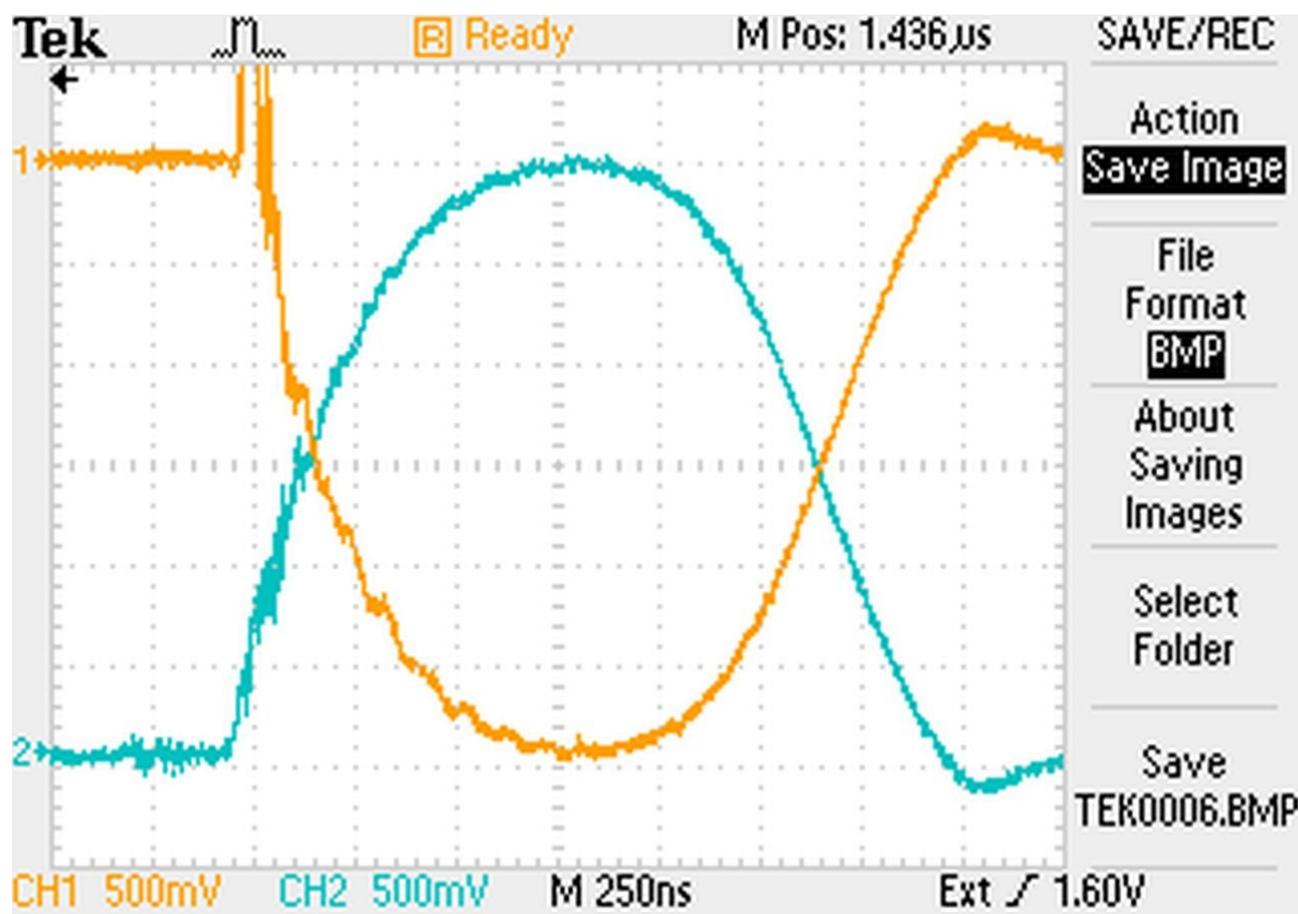


Рис. 7

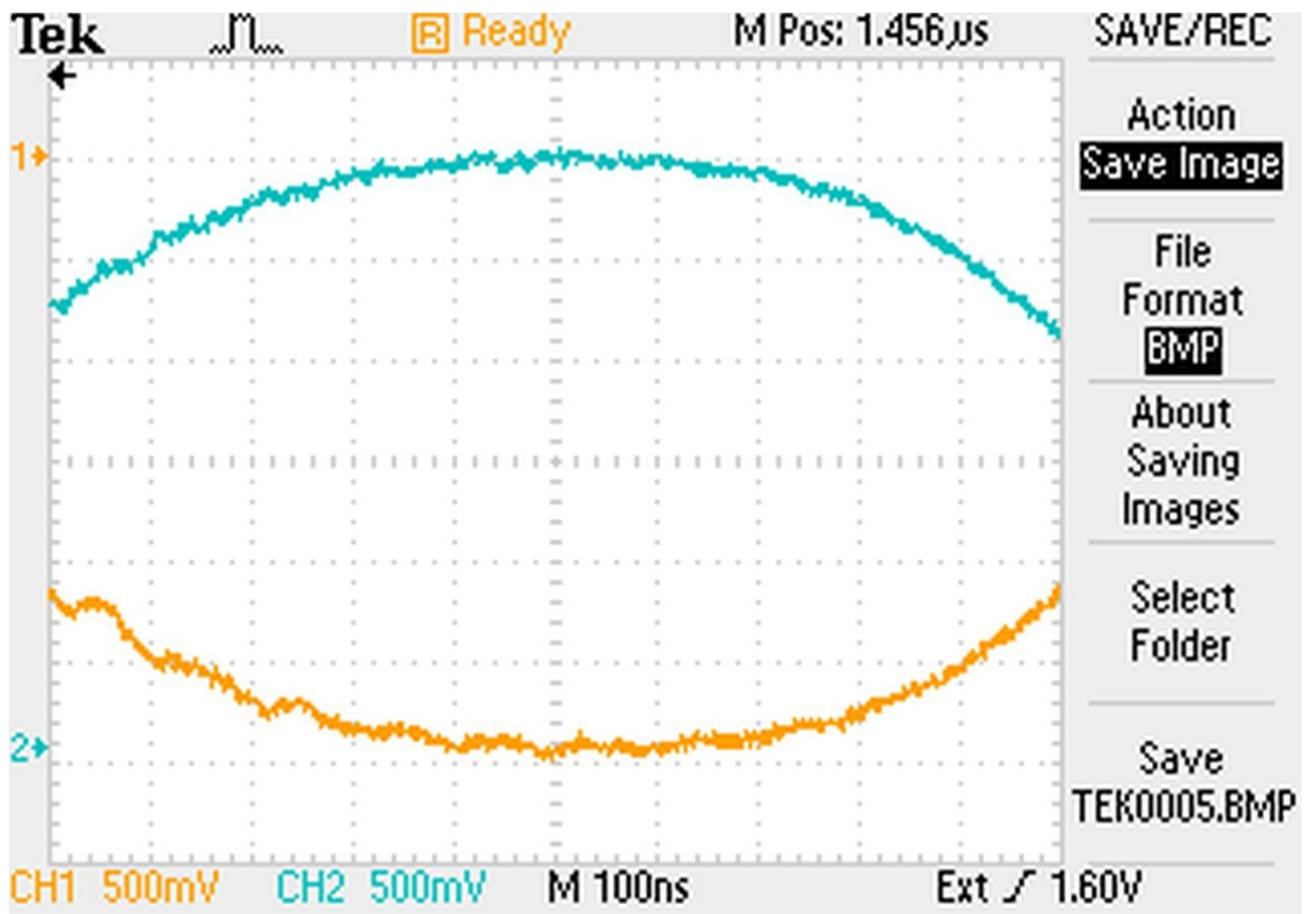


Рис. 8

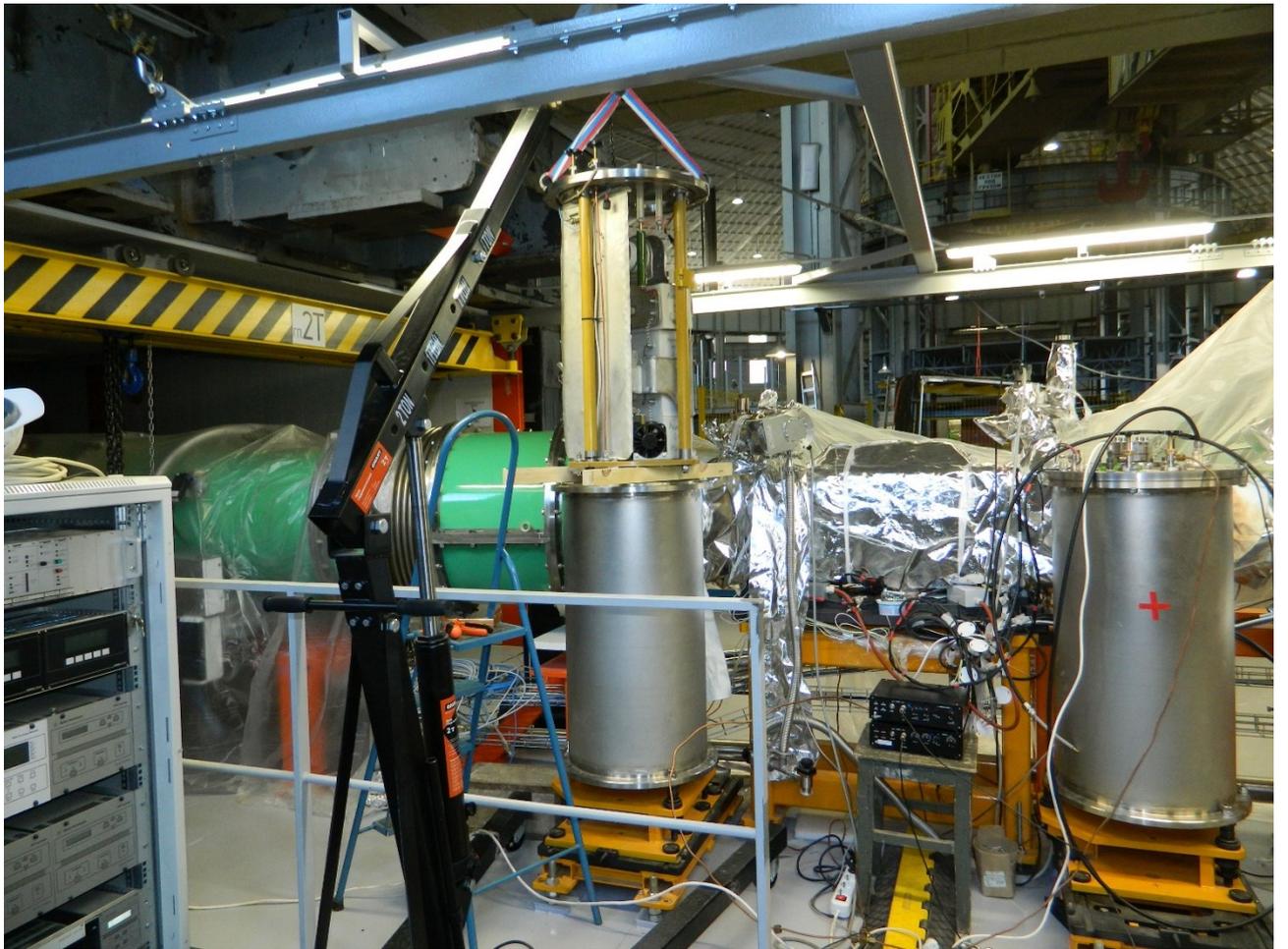


Рис. 9

Для связи с авторами:
E-mail: D.A.Shvedov@inp.nsk.su
Тел.: 8-913-398-14-61 (моб.)
Шведов Дмитрий Алесандрович

~~Для переводчика~~

~~**POWER GENERATORS OF KICKER MAGNET FOR EXTRACTION ION
FROM THE BOOSTER INTO THE TRANSPORT CHANNEL OF THE
NUCLOTRON**~~

~~To power the fast kicker magnet for releasing ions from the booster accelerator into the Booster–Nuclotron channel of the NICA accelerator complex (JINR, Dubna), generators based on ТП11-10к/75 pseudospark switches were developed, manufactured and tested. The choice of the switch was due to the unique requirements for the parameters of the output pulse and the impossibility of using solid-state high-voltage switches due to the high radioactive background in the beam bypass areas at the complex. To ensure a front of 500 ns and a pulse plateau duration of 500 ns in order to reduce the influence of the inductance of the magnet conductors of 650 nH, a decision was made to use its bipolar “counter” power supply. Thanks to this, currents of more than 30 kA were obtained at a charging voltage of the forming line of up to 50 kV. The article describes the generator circuits and presents the results of their tests at the BINP SB RAS and directly at the workplace at the NICA complex.~~

~~**Keywords:** accelerator, collider, storage ring, synchrotron booster, kicker, impact magnet, pulse, thyatron, duration, nanosecond, microsecond, front, cut, plateau, field uniformity, magnetic field, load, shaping line.~~

~~ЛИТЕРАТУРА~~

~~1. Alexandrov V.S., Gorbachev E.V., Tuzikov A.V., Fateev A.A. // Phys. of Particles and Nuclei Letters. 2012. V. 9. Iss. 4. P. 425.~~

~~<https://doi.org/10.1134/S1547477112040073>~~

~~2. Trubnikov G., Agapov N., Brovko O., Butenko A., Donets E., Eliseev A., Fimushkin V., Gorbachev E., Govorov A., Ivanov E., Karpinsky V., Kekelidze V., Khodzhbagiyan H., Kovalenko A., Kozlov O. et al. // Proc. of 4th International Particle Accelerator Conference IPAC'13. Shanghai, China, 2013. P. 1343.~~

~~3. Anchugov O.V., Shvedov D.A., Kiselev V.A., Zhuravlev A.N., Sinyatkin S.V., Bazhutov D.I., Tuzikov A.V., Fateev A.A., Petukhov A.S. // Instruments and Experimental Techniques. 2022. V. 54. P. 474.~~

~~<https://doi.org/10.1134/S0020441222040029>~~