

УДК 621.316.933: 621.384.663

Результаты испытаний наносекундных генераторов на основе псевдоискровых коммутаторов типа ТПИ для комплекса FEL университета Duke, США

*О. В. Анчугов, Ю. Г. Матвеев, Д. А. Шведов, В. Д. Бочков, Д. В. Бочков,
В. М. Дягилев, В. Г. Ушич, С. Ф. Михайлов, В. Г. Попов*

Для комплекса FEL (лазер на свободных электронах) университета Duke (США, Северная Каролина) разработаны и изготовлены генераторы инжекции и экстракции из бустера (промежуточного ускорителя), инжекции в основное кольцо и кикеров (отклоняющих пластин). В качестве быстрых коммутаторов использованы тиратроны типа ТПИ, которые имеют меньшее время нарастания анодного тока по сравнению с обычными тиратронами. Представлены результаты испытаний и эксплуатации генераторов и кикеров в рабочем режиме с пучком в течение более четырех лет.

PACS: 29.27.Ac; 52.80.Tn

Ключевые слова: кикер, генератор, импульс, наносекундный, инжекция, экстракция, фронт, тиратрон, коммутатор.

Введение

Для перепуска заряженных частиц из одного элемента ускорителя в другой используются отклоняющие пластины, на которые подаются высоковольтные импульсы наносекундной длительности [1]. Небольшая длительность необходима для того, чтобы "выбить" или наоборот "посадить" на равновесную орбиту ускорителя один пучок, не затрагивая при этом соседние.

Основные задачи при проектировании генераторов FEL-комплекса состояли в обеспечении:

минимального джиттера (временной нестабильности импульса);

минимального времени нарастания и спада импульсов;

для длинного импульса (100 нс) неравномерность вершины импульса не более $\pm 5\%$;

пятикратной перестройки амплитуды выходных импульсов при сохранении их формы.

Задача разработки, исследования и эксплуатации таких генераторов тесно связана с выбором типа коммутаторов, в качестве которых в кикерных устройствах обычно используются тиратроны с накаливаемым катодом или искровые разрядники.

При больших токах для обеспечения сверхбыстрой коммутации применяют тетродные тиратроны.

Недостатки классических тиратронов — появление неконтролируемых самозапусков, существенные затраты мощности в цепях накала привели к вытеснению их твердотельными приборами (ТПИ) [2, 3]. Однако высокая стоимость генераторов с ТПИ, значительные габаритные размеры и сложность их устройств заставляют разработчиков аппаратуры искать альтернативные ключи нового типа. В данной статье представлены результаты исследования и эксплуатации генераторов с псевдоискровыми коммутаторами ТПИ-типа [4].

Анчугов Олег Викторович, старший инженер.
Матвеев Юрий Георгиевич, ведущий инженер.
Шведов Дмитрий Александрович, старший инженер.
 Институт ядерной физики СО РАН им. Г. И. Будкера.
 Россия, 630090, Новосибирск, пр. Ак. Лаврентьева, 11.
 Тел. (383) 329-48-58. Факс (383) 330-71-63.
 E-mail: D.A.Shvedov@inp.nsk.su
Бочков Виктор Дмитриевич, директор.
Бочков Дмитрий Викторович, зам. директора.
Дягилев Владимир Михайлович, начальник лаборатории.
Ушич Владимир Георгиевич, ст. научный сотрудник.
 ООО "Импульсные технологии".
 Россия, 390023, г. Рязань, ул. Яблочкова, 5.
 E-mail: pulsetech@mail.ru
Михайлов Степан Федорович, ст. научный сотрудник.
Попов Виктор Георгиевич, ст. научный сотрудник.
 FEL Laboratory, Duke University, Durham, NC, USA.
 E-mail: vpopov@fel.duke.edu

Статья поступила в редакцию 28 мая 2009 г.

© Анчугов О. В., Матвеев Ю. Г., Шведов Д. А., Бочков В. Д., Бочков Д. В., Дягилев В. М., Ушич В. Г., Михайлов С. Ф., Попов В. Г., 2010.

Аппаратура и испытания

ТПИ-тиратроны с полым катодом, в основном работающие со сверхплотной формой тлеющего разряда, предназначены для коммутации количества электричества в импульсе до 10^{-4} — 10^{-1} Кл.

В схемах с заземленным катодом и режимами, сходными с классическими тиратронами с накаливаемым катодом, ТПИ обеспечивают высокие скорости развития разряда, коммутируя токи до десятков килоампер за 2—10 нс, выдерживают большие обратные напряжения при намного больших сроках службы, имеют более низкую стоимость, меньшие габаритные размеры и массу.

В коммерчески годном виде тиратроны ТПИ-типа начали производить в начале 2000 г.

Для определения возможности применения ТПИ в режимах с малыми временами развития разряда в Институте ядерной физики СО РАН совместно с ООО "Импульсные технологии" в течение 2001—2006 гг. проводили исследования этих приборов и режимов их управления.

Была разработана схема управления тиратроном по двум сеткам с постоянным и импульсным подготовительным разрядами на первой сетке (рис. 1), выявлены недоработки конструкции, показаны перспективы этих коммутаторов. В результате на основе тиратронов ТПИ-типа для комплекса FEL университета Duke были разработаны и изготовлены пять генераторов: два на тиратронах ТПИ1-1К/20 и три — на ТПИ1-10К/20.

Генератор инжекции (рис. 2) изготовлен с помощью тиратрона ТПИ1-1К/20, создающего в нагрузке с волновым сопротивлением 50 Ом прямоугольные биполярные импульсы длительностью 100 нс, с фронтом 5—10 нс и неравномерностью "полочки" не более ±5 % при амплитуде суммарного напряжения на отклоняющих пластинах от 5 до 10 кВ.

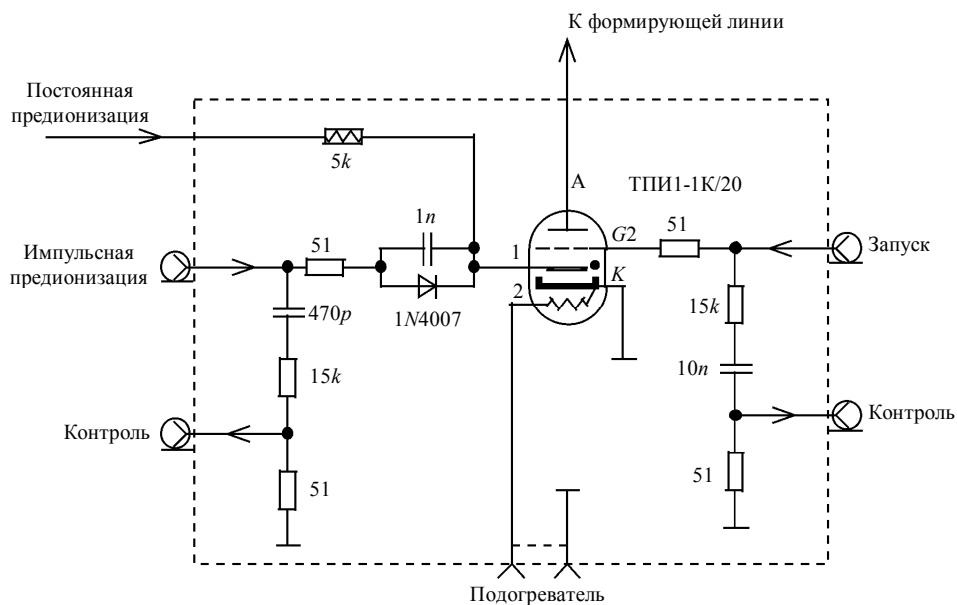


Рис. 1. Принципиальная схема управления ТПИ-тиратронами с постоянным и импульсным токами предионизации

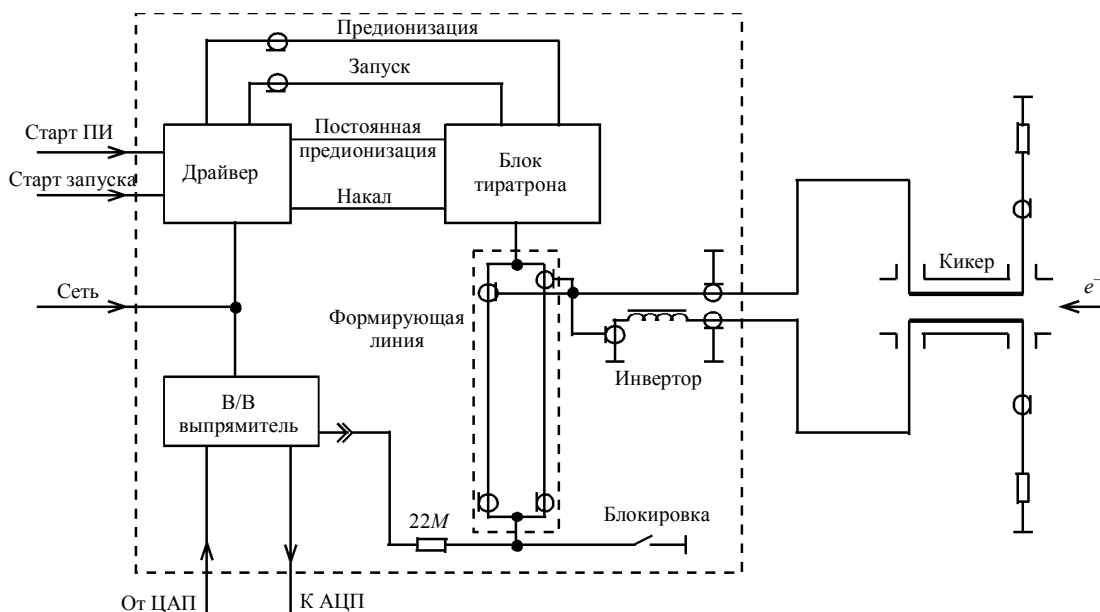


Рис. 2. Блок-схема генератора инжекции

Ввиду относительно невысокого напряжения была принята схема с одинарной формирующей линией, обеспечивающей минимальный фронт импульса, ограничиваемый только скоростью срабатывания тиратрона. Чтобы не использовать два разных генератора для питания верхней и нижней отклоняющих пластин, вторая пластина подключается через инвертор. Последний выполнен в виде ферритового кольца с намотанным на него коаксиальным кабелем РК. В качестве формирующей линии использованы два кабеля РК, включенных параллельно.

Экспериментально было выяснено, что согласование оптимально, если волновое сопротивление одного из кабелей будет 75, а другого 50 Ом. При этом волновое сопротивление формирующей линии становится равным 30 Ом, чтобы компенсировать внутреннее сопротивление тиратрона, которое в данном включении составило 5 Ом. Выходной импульс на нагрузке 50 Ом имеет фронт порядка 5 нс.

На рис. 3 показаны осциллограммы импульсов на согласующей нагрузке пластины кикера инжекции при перестройке по зарядному напряжению в необходимом рабочем диапазоне 2—12 кВ с шагом 1 кВ. При этом остальные параметры режима работы ТПИ: напряжение накала, амплитуды импульсов предионизации и поджига — не менялись. Из приведенной иллюстрации следует, что в заданном диапазоне форма импульса является вполне приемлемой. Наблюдаемая задержка срабатывания коммутатора легко компенсируется изменением временных параметров запускающих импульсов.

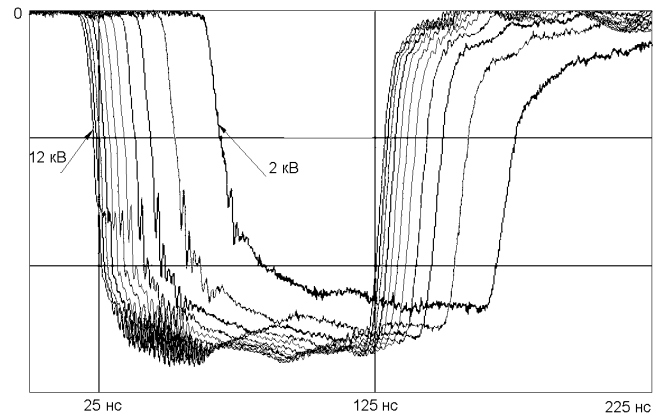


Рис. 3. Осциллограммы импульсов в приведенном масштабе на нагрузке кикера инжекции при изменении зарядного напряжения формирующей линии генератора от 2 до 12 кВ с шагом 1 кВ

Так как требуемая длительность импульса экстракции сравнительно мала (не более 15 нс по уровню 10 % от основания), то в данном случае возможно применение так же, как и для инжекции, коммутаторов ТПИ1-1К/20 как наиболее быстрых по времени развития разряда, при их максимальных анодных напряжениях (25 кВ). В отличие от инжекции для уменьшения времени экспозиции анодного напряжения при его пиковых значениях применена импульсная зарядка формирующей линии через высоковольтный повышающий трансформатор, на первичную обмотку которого разряжается конденсатор. Время зарядки формирующей линии составило 180 мкс. Для реализации данного проекта была выбрана схема с отдельным питанием каждой пластины от отдельного генератора (рис. 4).

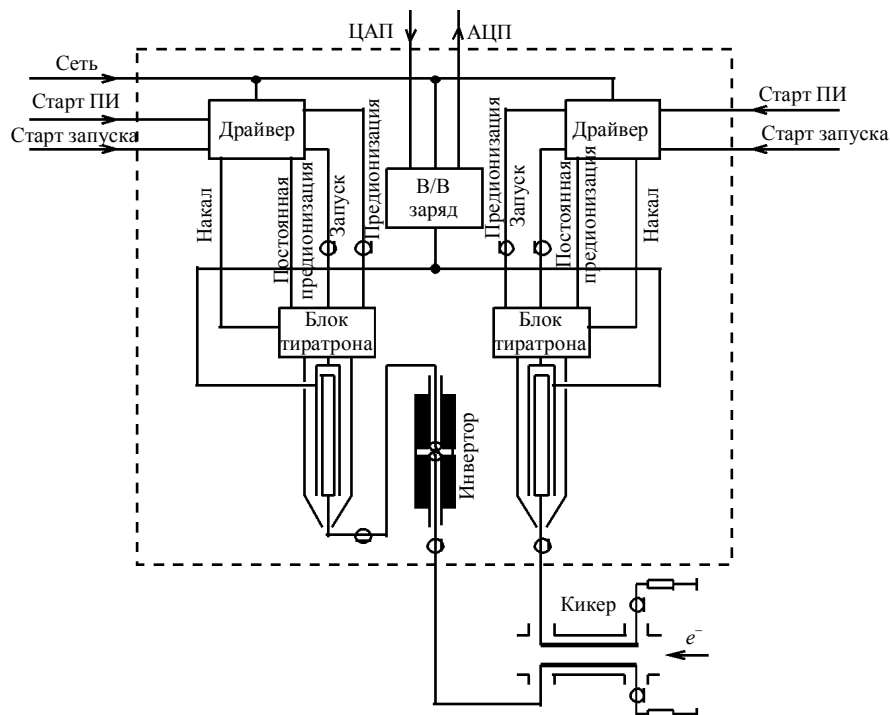


Рис. 4. Блок-схема генератора экстракции

Оба генератора выполнены по схеме с двойной коаксиальной формирующей линией для обеспечения выходного напряжения каждого генератора до 20 кВ. Получить такие напряжения на одинарной формирующей линии при использовании тиратронов ТПИ1-1К/20 не представлялось возможным. Ведь в этом случае анодное напряжение на тиратроне пришлось бы поднимать до уровня 50 кВ.

Оба генератора сделаны идентичными, но в цепь одной из пластин включен инвертор, обеспечивающий положительную полярность ее питания. Время нарастания выходного импульса оставалось неизменным, т. е. ~9—10 нс на уровне 0,1—0,9 во всем диапазоне напряжений от 4 до 20 кВ и, соответственно, тока через коммутатор от 240 до 1200 А.

Генератор, собранный по схеме рис. 4, имеет преимущество в том, что он обеспечивает выходное напряжение, равное зарядному, но при этом проявляется определенный недостаток двойной коаксиальной формирующей линии — ухудшение фронта выходного импульса примерно в два раза по отношению к времени срабатывания коммутатора. Однако даже при повышении зарядного напряжения до 25 кВ с данными тиратронами были получены приемлемые параметры выходных импульсов.

Импульсы с согласующих нагрузок идентичны. Джиттер составляет менее 200 пс. На рис. 5 в приведенном масштабе показана динамика изменения формы импульсов с согласующей нагрузки одной из пластин кикера экстракции при пятикратном

изменении зарядного напряжения (от 5 до 25 кВ) и неизменных параметрах запуска псевдоискрового коммутатора. Видно, что в данном диапазоне форма импульса соответствует поставленным требованиям режима экстракции частиц из бустера.

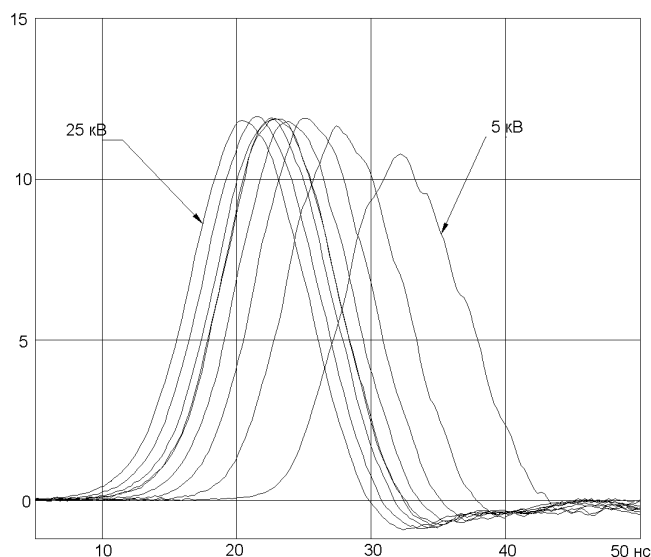


Рис. 5. Осциллограммы импульсов в приведенном масштабе на нагрузке кикера экстракции при изменении зарядного напряжения формирующей линии генератора от 5 до 25 кВ с шагом 2,5 кВ

В генераторе инжекции основного кольца (рис. 6) применен псевдоискровой коммутатор ТПИ1-10К/20. Он обеспечивает амплитуду суммарного напряжения от 10 до 50 кВ на волновом сопротивлении пластин 25 Ом при длительности импульса на уровне 10 % от основания не более 100 нс.

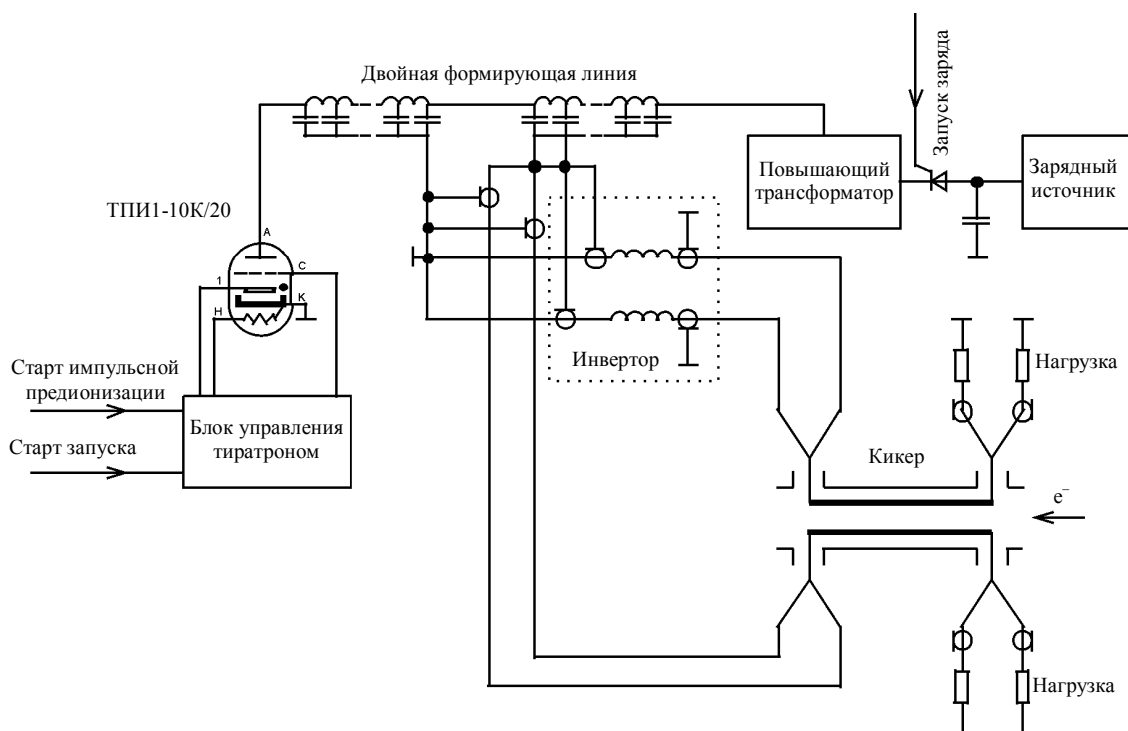


Рис. 6. Блок-схема генератора инжекции в основное кольцо

В данном случае также было решено использовать двойную формирующую линию, так как требования к фронтам импульса менее жесткие, а напряжение достаточно высокое. Обе пластины питаются от одного генератора, но поскольку их волновое сопротивление 25 Ом, то они подключаются через два параллельных кабеля РК-50, поэтому волновое сопротивление линии составило 6 Ом. Этим был обусловлен выбор коммутатора — более сильноточный тиратрон ТПИ1-10К/20, рассчитанный на рабочий ток 10 кА и напряжение более 20 кВ.

В приведенной схеме при зарядном напряжении 25 кВ коммутируемый им ток составляет около 4 кА. Формирующая линия выполнена на дискретных элементах — керамических высоковольтных конденсаторах и индуктивностях в виде отрезков медных проводников.

В данных генераторах при перестройке зарядного напряжения от 5 до 25 кВ и, соответственно, токов от 800 до 4000 А форма импульса не менялась.

Заключение

Выбор коммутаторов типа ТПИ обеспечивает заданные требования к генераторам: джиттер не более 0,8 нс; время нарастания и спада импульсов — 4—5 нс; неравномерность "полочки" для длинного импульса (100 нс) — не более 5 %; возможность пятикратной перестройки по выходному напряжению при сохранении формы импульсов.

Кроме того:

- значительно упрощена конструкция за счет использования одного ключа для питания обеих

пластин кикера и большого тока коммутации (до 10 кА);

- достаточно высокая надежность генераторов и технологичность при изготовлении и сборке, на ускорительном комплексе практически не наблюдаются самопробои.

Генераторы эксплуатировались на комплексе FEL университета Duke (США) Северная Каролина с 2005 г. С начала регулярной работы системы наработано не менее 2000 ч. За это время основные проблемы были с надежностью работы драйверов, которые к настоящему времени практически устранены. После 2000 ч стал наблюдаться рост падения напряжения в тиратроне на электроде предионизации от протекающего постоянного тока. Для снижения этой тенденции вместо постоянной вводится "квазипостоянная" предионизации с подачей слаботочного импульса поджига, предшествующего запуску тиратрона не более чем на 1 мс.

Литература

1. *Mikhailov S. F., Litvinenko V., Busch M. et al.* Status of the Booster Synchrotron for Duke FEL Storage Ring, 2003 Part. Acc. Conf., Portland, USA, 2003.
2. *Cook E., Hickman B., Lee B., Hawkins S., Gower E., Allen F.* Design and Testing of a Fast, 50 kV Solid-State Kicker Pulser: Proc. 2002 International Power Modulator Conference. — Hollywood, USA, 2002. P.106.
3. *Hardev Singh, Harry L. Moore.* Pulsed Power Switching Technology: Ibid. P. 23.
4. *Бочков В. Д., Королев Ю. Д.* Импульсные газоразрядные коммутирующие приборы: Энциклопедия низкотемпературной плазмы/Под ред. академика В. Е. Фортова, вводный том. Кн. 4. — М.: Наука, 2000. С. 446—459.

Test results for nanosecond generators based on pseudospark switches of TPI type for the FEL Lab of Duke University (North Carolina, USA)

O. V. Anchugov, Yu. G. Matveev, D. A. Shvedov
Budker Institute of Nuclear Physics SB RAS,
11 Academician Lavrentev av., 630090, Novosibirsk, Russia
E-mail: D.A.Shvedov@inp.nsk.su

V. D. Bochkov, D. V. Bochkov, V. M. Dyagilev, V. G. Ushich
Pulsed Technologies Ltd., 5, Jablochkova str., 390023 Ryazan, Russia
E-mail: pulsetech@mail.ru

S. F. Mikhailov, V. G. Popov
FEL Laboratory, Duke University, Durham, NC, USA
E-mail: vpopov@fel.duke.edu

For the FEL (Free Electron Laser) Lab of Duke University (North Carolina, USA), generators of injection and extraction from the booster (intermediate accelerator), injections into the main ring and kickers (rejecting plates) have been designed and manufactured. As fast switches, thyratrons of

TPI type have been used, which have a shorter rise time of anode current in comparison with usual thyratrons. Test and service results for generators and kickers in operating conditions with a beam for the period of more than four years are presented.

PACS: 29.27.Ac; 52.80.Tn

Keywords: kicker, generator, pulse, nanosecond, injection, extraction, rise time, thyatron, switch.

Bibliography — 4 references.

Received 28 May 2009