

Высоковольтные наносекундные генераторы для питания кикеров ускорителей заряженных частиц

В.Н. Корчуганов, Ю.Г. Матвеев, Д.А. Шведов
Институт ядерной физики им. Г.И.Будкера СО РАН, Новосибирск, Россия

1. Типы генераторов

В работе рассмотрены высоковольтные наносекундные генераторы (далее ВНГ) прямоугольных импульсов, разработанные в ИЯФ СО РАН для питания быстрых кикеров инжекции и экстракции ускорительно-накопительных комплексов. В этих генераторах в качестве коммутаторов используются импульсные водородные тиратроны и газонаполненные разрядники. При необходимости фронты импульсов ВНГ могут укорачиваться до 2–3 нсек в коаксиальных линиях, заполненных ферритовыми кольцами. Механизм укорочения фронтов импульсов рассмотрен в [7, 8]. В табл. 1 приведены основные параметры разных типов ВНГ.

Таблица 1. Основные параметры импульсов ВНГ на разрядниках и на тиратронах.

Рабочие параметры ВНГ	ВНГ на разрядниках	ВНГ на тиратронах с одинарными форм. линиями (ОФЛ). (Накопитель Нанохана, Япония)	ВНГ на тиратронах с двойными форм. линиями (ДФЛ). (Инжекция в бустер Наноханы)	ВНГ на тиратронах с ДФЛ и ферритовыми линиями-обострителями. (Выпуск из бустера Наноханы и БЗ-М (ВЭПП-2000))
Амплитуда выходных импульсов напряжения, кВ	≤ 100 (ВЭП-1, [1]) ≤ 50 (ВЭПП-2 и Сибирь, [2, 3, 5,6]) ≤ 300 (ВЭПП-3, [4])	12.5	25	25
Фронт импульса, нсек	2 – 5	≥ 30	≥ 40	2 – 3
Нестабильность синхронизации, нсек	± 3 [4] 1 (r.m.s) [5,6] ± 50 [1]	≤ 0.6 (r.m.s)	≤ 0.6 (r.m.s)	≤ 0.6 (r.m.s)
Амплитуда тока кикера, кА	1	6	2	2

Примечание: в таблице в квадратных скобках [] указаны ссылки на литературу.

2. Генераторы с коммутаторами - разрядниками

В ИЯФ СО РАН в связи с разработкой метода встречных заряженных пучков возникли задачи однооборотной инжекции и экстракции в ускорителях и накопителях. Изначально ускорители имели малые размеры и соответственно малые времена обращения частиц. Эти обстоятельства потребовали создания генераторов с короткими прямоугольными импульсами, имеющими крутые фронты и срезы.

Для установки ВЭП-1 был создан ВНГ однополярных импульсов [1] на 3 газонаполненных разрядниках с подвижными электродами. Амплитуда выходных импульсов достигала 100 кВ при длительности 14 нсек и

с фронтами 1 нсек. При этом использовались разрядники разных типов (тригatron, обостритель и разрядник, закорачивающий «хвосты импульса»).

Основными недостатками этого генератора являлись нестабильность синхронизации (до ± 50 нсек) и низкая эффективность устранения послеимпульсов, поэтому кикеры питались от одного генератора.

Для накопительного комплекса ВЭПП-2 были созданы более совершенные ВНГ на однотипных газонаполненных трехэлектродных разрядниках [2, 3] с подвижными электродами. Нестабильность синхронизации была уменьшена до нескольких наносекунд. Эксплуатация генераторов осложнялась необходимостью периодической проочки маслозаполненных высоковольтных вводов и кабелей.

Для комплекса ВЭПП-3 был создан генератор с максимальной амплитудой импульсов до 300 кВ и частотой следования импульсов до 25 Гц для работы на несогласованную нагрузку. Времена фронтов нарастания и спада ≈ 3 нсек [4].

Для комплекса источника СИ «Сибирь-2» (РНЦ им. Курчатова, г. Москва) созданы новые ВНГ на газонаполненных разрядниках [5, 6] со следующими особенностями:

- выходы генератора имеют разнополярные импульсы,
- разработана очень простая схема с одним импульсным источником питания,
- формирующие линии выполнены двухступенчатыми (ДФЛ), что уменьшило требования к изоляции ВВ-трансформатора, формирующих линий и разрядников,
- разрядники выполнены с неподвижными электродами,
- переход на использование газовой изоляции вместо масляной, что резко упростило эксплуатацию и удешевило производство генераторов.

Среднеквадратичное значение джиттера удается поддерживать на уровне 1 нсек.

Принципиальная схема нового биполярного генератора, разработанного на базе ВНГ для Сибири-2, показана на рис. 1. Двойные формирующие линии заряжаются параллельно от низковольтного импульсного источника питания «ГИМН» через повышающий трансформатор TR1 и зарядные сопротивления 12 кОм. После прихода поджигающего импульса на средний электрод 3-электродного разрядника формирующие линии последовательно разряжаются в нагрузку (пластины кикера). Полярность выходного импульса определяется способом включения разрядника в цепь разряда формирующей линии. Этот генератор имеет два 50-омных разнополярных выхода. Амплитуда выходных импульсов до 50 кВ, длительность на полувысоте 10 нсек, фронт 1.5–2 нсек и срез ≈ 4 нсек. Для улучшения стабильности синхронизации в цепи поджига применены две спиральные линии по 600 Ом. Поэтому нестабильность синхронизации (среднеквадратичное отклонение) не превышает 1 нсек.

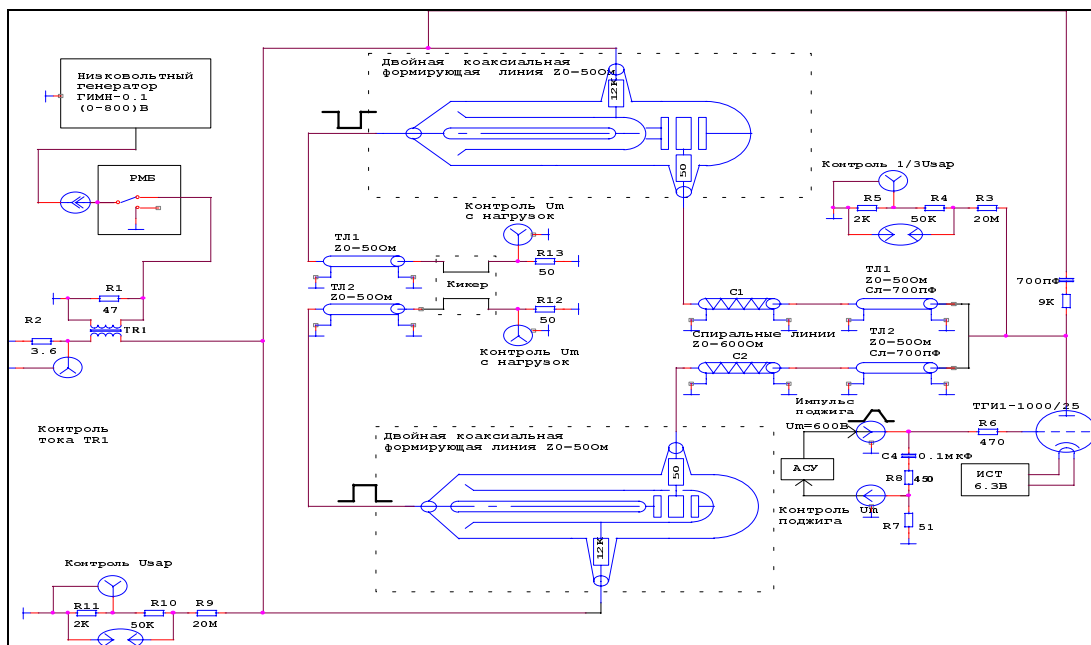


Рис. 1. Принципиальная схема биполярного генератора с коммутаторами на 3-электродных разрядниках с двойными формирующими линиями с распределенными параметрами. Выходное сопротивление генератора 50 Ом.

Спиральные линии (С1 и С2) увеличивают амплитуду импульсов поджига, что несколько уменьшает джиттер и увеличивает динамический диапазон перестройки разрядников. Электрическая длина формирующих линии ≈ 10 нсек. Ресурс работы разрядников (без регулировки зазоров или смены электродов) составляет десятки миллионов импульсов.

3. Генераторы с тиратронными коммутаторами

В достаточно больших установках с большими периодами обращения частиц (>90 нсек) требования к крутизне фронтов импульсов ВНГ снижаются. В связи с этим стало актуальным использование для задач инжекции-экстракции генераторов с тиратронными коммутаторами-тиратронами (с водородным заполнением), эксплуатация которых проще и дешевле.

Разработанные тиратронные генераторы различаются:

1. По типу используемых формирующих линий:
 - а) линии одинарные и двойные;
 - б) с распределенными и с сосредоточенными параметрами;
 - в) газонаполненные и без газового заполнения.
2. По наличию или отсутствию дополнительного обострения перепадов (фронтов и срезов), получаемых с помощью ферритовых линий.
3. По величине выходного сопротивления.

Для всех разновидностей описанных в этой работе генераторов на тиратронах общими являются:

- а) использование накала тиратронов, стабилизированного до $\pm 5 \cdot 10^{-4}$;
- б) максимальное зарядное напряжение формирующих линий не превышает 25 кВ;
- в) наличие экранирующего кожуха, общего для тиратрона и формирующей линии;
- г) наличие шкафа с приборами защиты от попадания под напряжение (заземлитель, блокировка).

Стабилизация накала тиратронов до $\pm 5 \cdot 10^{-4}$ необходима для надежного ограничения нестабильности их запуска меньше 1 нсек.

Тиратронный генератор на двойной формирующей линии с сосредоточенными параметрами, с последующим обострением с помощью ферритовой линии планируется поставить на комплексе ВЭПП-2000 в Институте ядерной физики СО РАН вместо генератора на 3-электродном разряднике с последовательным управлением типа [7]. Кроме того, подобным генератором предполагается оснастить кикеры экстракции бустера – синхротрона комплекса Нанохана, Япония [9].

На рис. 2 изображена принципиальная схема генератора. Основными элементами схемы являются:

- ГИМН-0,1 – импульсный стабильный (до $2 \cdot 10^{-3}$) источник питания с напряжением (0-800) В,
- TR1 – высоковольтный импульсный повышающий трансформатор,
- R2 – резистор, задающий зарядный ток формирующей линии,
- R3 – контроль тока трансформатора,
- Rш – резистор контроля тока тиратрона,
- R5, R6 – резисторы, образующие делитель в цепи поджига тиратрона,
- ТЛ1-ТЛ4 – транспортные линии (50-омные кабели),
- коаксиальные ферритовые линии с длиной 800 мм, заполненные кольцами М20×12×6 1000НН мм;
- Rн – оконечные согласующие нагрузки с измерительными делителями для контроля амплитуды импульсов тока и напряжения, проходящих через ферритовые линии.

Двойная формирующая линия состоит из двух ступеней, которые заряжаются параллельно, а разряжаются последовательно. Каждая ступень состоит из двух секций, так же включенных параллельно. Каждая секция состоит из 8 ячеек. Каждая ячейка образуется двумя последовательно включенными конденсаторами с емкостью 470 пФ и индуктивностью 74 нГн. Каждая секция имеет волновое сопротивление 25 Ом, а каждая ступень 12,5 Ом. Так как при срабатывании тиратрона ступени разряжаются последовательно, то выходное сопротивление генератора равно 25 Ом.

Запуск тиратрона производится на вершине зарядного напряжения. Резистор R1, стоящий в первичной обмотке трансформатора, вносит большое затухание в колебательный контур, уменьшая амплитуду зарядного напряжения во втором и третьем полупериодах до 20% от напряжения в первом полупериоде во избежание повторных срабатываний тиратрона. Резистор R2 обеспечивает развязку формирующей линии при ее разряде от зарядной цепи. Накал тиратрона питается стабилизированным источником напряжения на 6.3 В, что обеспечивает малый джиттер выходных импульсов.

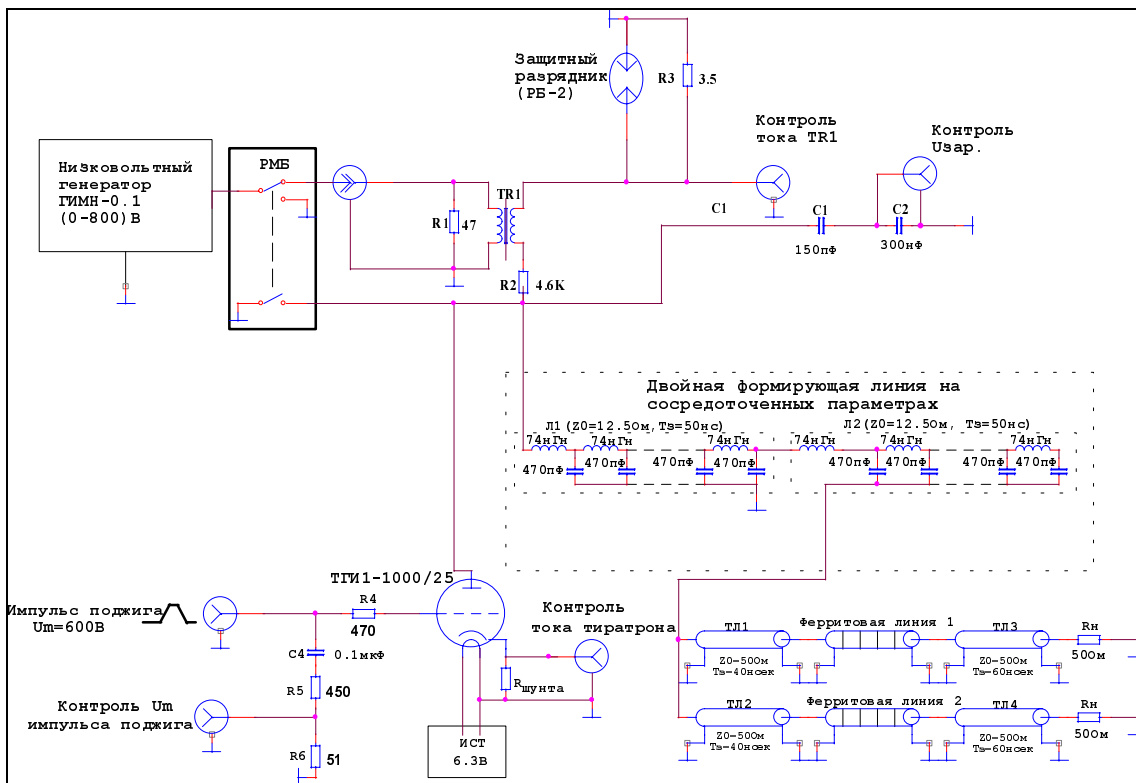


Рис. 2. Принципиальная схема генератора на двойной формирующей линии со сосредоточенными параметрами с обострением на ферритовых линиях.

Для безопасного обслуживания имеется размыкатель РМБ. Он разрывает питающую сеть, снимает высокое напряжение при открывании дверей металлического шкафа, в котором располагается генератор. Источник питания ГИМН через повышающий высоковольтный трансформатор TR1 заряжает двойную формирующую линию на сосредоточенных параметрах до рабочего напряжения (не более 25 кВ). В этот момент тиратрон, запущенный триггером от схемы управления, разряжает формирующую линию на нагрузку через транспортные линии и две параллельно включенные коаксиальные ферритовые линии. На ферритовых линиях фронт импульса укорачивается до 2-5 нсек и далее поступает на согласующую активную нагрузку с измерительным делителем на конце или непосредственно на кикер.

На рис. 3 приведены осциллограммы выходных импульсов этого генератора, снятые осциллографом TDS-3032.

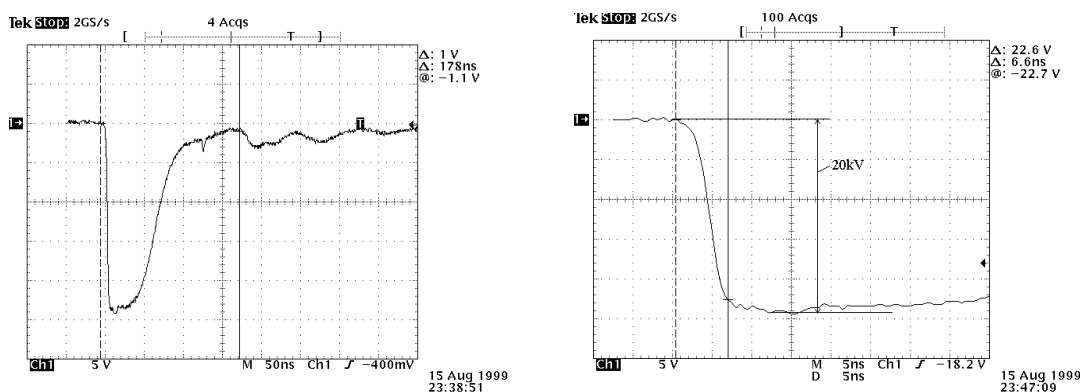


Рис. 3. Осциллограммы импульсов с выхода ферритовых линий на нагрузку 50 Ом. Время нарастания на уровне 0.1-0.9 $t_p=3$ нсек получено за счет обострения ферритовыми линиями. Временной масштаб по горизонтальной оси 50 нс/см и 5 нс/см.

Литература

- [1] Б.Г. Ерозолимский, Ю.Г. Матвеев и др. Генератор одиночных наносекундных импульсов высокого напряжения. ПТЭ, №2, 1963, с. 93-97.
- [2] А.В. Киселев. Доклады Всесоюзного совещания по ускорителям со встречными пучками и физике частиц сверхвысоких энергий, ч.1, 1963, Новосибирск, с. 113-141.
- [3] А.В. Киселев. Диссертация. - Новосибирск, 1965.
- [4] А.А. Авдиенко, Ю.Г. Матвеев и др. «Мощный высоковольтный наносекундный генератор». ПТЭ, №2, 1977, с. 129-131.
- [5] A. Kadnikov, Y. Matveev. Experimental investigation of high voltage nanosecond generators of injection system for «Siberia-2» storage ring. Proceedings of the 1993 Particle Accelerator Conference. v. 2, p.1348.
- [6] V. Korchuganov, Y. Matveev, D. Shvedov. High Voltage nanosecond generators for «Siberia-2». P Proceedings of the 1995 Particle Accelerator Conference and International Conference on High Energy Accelerators, v.2, p. 1266, WAA18.
- [7] Ю.Г. Матвеев, Д.А. Шведов. Коаксиальные линии с ферритовым заполнением для обострения перепадов мощности. - Новосибирск, Институт ядерной физики СО РАН, 2000 (в печати).
- [8] И.Г. Катаев. Ударные электромагнитные волны. «Советское радио», Москва, 1963.
- [9] V. Korchuganov, E. Levichev, N. Mezentsev, V. Sajaev, K. Takahashi, K. Aizawa, S. Kamia, Y. Oku, K. Ohwaki. The Nanohana 2 GeV Synchrotron light source. NIM A448 (2000) 27-31.