

## ПРИМЕНЕНИЕ ТИРАТРОНОВ С НЕНАКАЛИВАЕМОМ КАТОДОМ ДЛЯ ФОРМИРОВАНИЯ СЕРИИ ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ СИЛЬНОТОЧНЫХ ИМПУЛЬСОВ

Описана схема модулятора, обеспечивающего питание индуктивно-резистивной нагрузки в двухимпульсном режиме током до 10 кА и длительностью импульса 300 нс. В качестве коммутаторов использованы тиратроны с ненакаливаемым катодом ТПИ1-10к/50 и ТПИ5-10к/50, рассчитанные на анодное напряжение до 50 кВ. Представлены результаты испытаний, подтверждающие возможность восстановления обратной электрической прочности тиратрона за единицы микросекунд после протекания прямого анодного тока до 10 кА.

*Ключевые слова:* формирование импульсов, тиратрон, ненакаливаемый катод, электрическая прочность, время восстановления.

### Введение

В различных применениях ускорительной техники требуется получать на нагрузке серию из последовательных высоковольтных сильноточных импульсов. В Институте ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН разработан прототип модулятора, который позволяет формировать на индуктивно-резистивной нагрузке серию из двух импульсов напряжением до 20 кВ, током до 10 кА, длительностью полки импульса 300 нс. Интервал между импульсами может варьироваться в широких пределах начиная от 2 мкс.

На рис. 1 представлена схема модулятора, обеспечивающего двухимпульсное питание нагрузки. Модулятор состоит из двух соединенных параллельно формирующих линий ФЛ1 и ФЛ2, каждая из которых коммутируется через соответствующий ключ (Л1, Л2) на согласованную нагрузку, которая представляет собой параллельное соединение резистора  $R_n$  и индуктора  $L_n$ .

Для формирования первого импульса достаточно открыть первый ключ Л1. При формировании второго импульса, за счет открывания второго ключа Л2, к ключу Л1 прикладывается обратное напряжение, рав-

ное напряжению на нагрузке. В связи с этим необходимо, чтобы за время паузы между импульсами первый ключ восстановил свою электрическую прочность и при открывании второго ключа не проводил ток в обратном направлении. Для развязки одной формирующей линии от другой можно применять магнитный вентиль (МВ), однако наиболее эффективное решение будет при наличии диодных свойств у самих ключей. Такие ключи должны обеспечивать время восстановления обратной электрической прочности ключа в пределах единиц микросекунд, а в идеале – сотен наносекунд при анодном напряжении 40–50 кВ, импульсном токе до 10 кА длительностью до 300 нс, при этом иметь стабильность отпираания (джиттер) не хуже 2 нс и время коммутации не более 50 нс.

Наиболее часто в установках импульсной энергетики в качестве коммутаторов используются тиратроны с накаливаемым катодом и твердотельные приборы, например сильноточные биполярные транзисторы с изолированным затвором (IGBT) и мощные полевые транзисторы (MOSFET) [1; 2; 3].

Время восстановления обратной электрической прочности тиратрона в основном

зависит от величины и длительности коммутируемого тока, анодного напряжения, скорости его нарастания, величины давления рабочего газа – водорода, импеданса сеточной цепи. В обычных условиях плотность плазмы в анодно-сеточном и катодно-сеточном промежутках падает с различной скоростью. При этом катодно-сеточный объем восстанавливается в 2–4 раза медленнее. В качестве аналогии можно привести данные производителя тиратронов «Marconi Applied Technologies», согласно которым время восстановления прямой электрической прочности пентодного тиратрона с накаливаемым катодом CX1835 после коммутации тока 1 кА, при последующем приложении анодного напряжения 1 кВ, напряжении смещения сетки –300 В составляет  $3 \div 3,5$  мкс. При увеличении тока и напряжения время восстановления прямой электрической прочности резко возрастает.

В различных работах [1; 2; 3] приводятся данные, подтверждающие возможность создания коммутаторов на твердотельных ключах, рассчитанных на десятки киловольт и токи до нескольких килоампер. Но в то же время до сих пор не удалось совместить в сборках на твердотельных ключах одновременно высокие напряжения (десятки киловольт), большие токи (единицы килоампер), малые времена коммутации ключей (десятки наносекунд) и малые габариты твердотельного коммутатора.

### Особенности конструкции ТПИ-тиратронов и управления ими

Анализ существующих коммутаторов и их испытания показали, что весьма перспективными для данного применения являются

тиратроны с ненакаливаемым катодом (pseudospark switches) [4], в частности тиратроны ТПИ1-10к/50, способные коммутировать ток до 10 кА при анодном напряжении до 50 кВ.

Конструкция высоковольтных электродов и их расположение относительно изолятора тиратрона ТПИ1-10к/50 типичны для 2-секционных классических тиратронов – имеются анод, градиентная сетка, катод, управляющая сетка и электрод предыонизации (рис. 2). Основное отличие, присущее тиратронам типа ТПИ, – использование в качестве источника тока эффективного разряда в полном безнакальном катоде патентованной конструкции.

Отсутствие нагретого до температуры свыше  $800^\circ\text{C}$  катода обеспечивает в прикатодной области, ответственной за формирование разряда, в 2–3 раза большую плотность водорода, что создает условия для снижения времени коммутации, а отсутствие постоянной эмиссии электронов ускоряет процесс деионизации после окончания импульса тока. Одновременно это упрощает конструкцию тиратрона, устраняет дополнительный нагрев – отпадает необходимость в источнике питания нагревателя и принудительном охлаждении прибора.

Для получения надежной работы тиратрона ТПИ1-10к/50 выбрана схема двухимпульсного управления (см. рис. 2). На электрод предыонизации G1 подается напряжение постоянного вспомогательного разряда  $U_{\text{DAD}} = 0,8 \div 1,5$  кВ и импульс предыонизации  $U_{\text{PAD}} = 1 \div 3$  кВ, на сетку G2 подается постоянное отрицательное смещение  $U_{\text{bias}} = -(50 \div 150)$  В и импульс запуска  $U_{\text{trig}} = 2 \div 6$  кВ.

Необходимо отметить, что отсутствие накаливаемого катода дает кроме вышена-

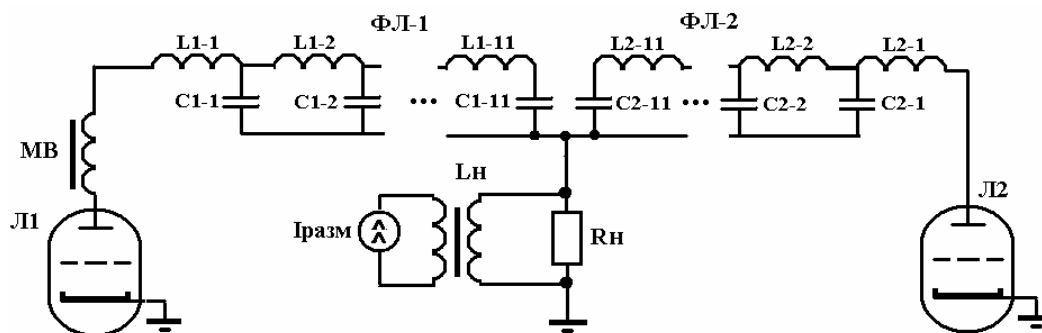


Рис. 1. Принципиальная схема модулятора

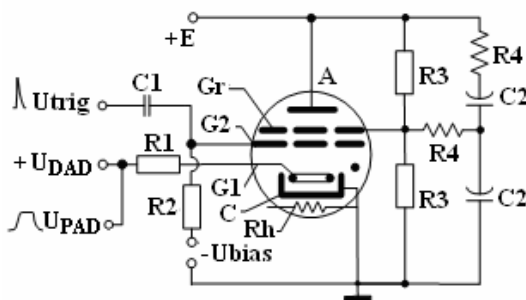


Рис. 2. Принципиальная схема систем питания и запуска тиратрона ТПИ1-10к/50 (А – анод; Gг – градиентный электрод; G2 – сетка; С – катод; G1 – электрод предыонизации; Rh – накал генератора водорода; R3, R4, C2 – RC делитель)

званных дополнительно еще несколько улучшений. Во-первых, нет процесса выхода активных компонентов катода (бария-стронция-кальция) в анодно-сеточную камеру, что обеспечивает стабильно высокую электропрочность. Во-вторых, существует возможность иметь при встраивании патентованного устройства «СРНВ» вариант тиратрона, вообще не требующего цепей накала, т. е. коммутатора, который может работать не только без нагрева катода, но и, что не менее важно, без нагрева генератора водорода (в настоящее время освоен выпуск ТДИ-СН тиратрона, например ТДИ1-50к/45-СН, и идут испытания ТПИ-СН). При этом не только сохраняются параметры, но и улучшаются эксплуатационные характеристики приборов, в том числе увеличивается диапазон рабочих температур окружающей среды, упрощаются схемные решения при работе с незаземленным потенциалом катода (или и катода, и анода), обеспечивается мгновенная готовность к работе. Такое решение позволяет иметь принципиально новые коммутаторы, сочетающие лучшие качества тиратронов, вакуумных и искровых разрядников, твердотельных приборов.

### Коммутационные характеристики тиратронов ТПИ1-10к/50

Подробно результаты исследования коммутационных характеристик тиратрона ТПИ1-10к/50, таких как время развития разряда, время коммутации, стабильность отпирания, падение напряжения на ключе, были изложены в работе [5]. В настоящее время выпущена модифицированная модель тиратрона. Испытания показали его качест-

венное отличие от предыдущей модели, в частности прибор имеет напряжение горения разряда предыонизации  $\sim 110$  В (вместо 300–400 В), увеличен диапазон напряжений генератора водорода ( $\Delta U_{Rh} = 0,7 \div 1,0$  В), что улучшает его энергетические, ресурсные и временные характеристики. Время запаздывания анодного тока и его джиттер укладываются соответственно в пределы  $50 \div 60$  и  $2 \div 4$  нс в диапазоне  $U_{Rh}$ , близком к верхнему пределу (5,2–5,6 В). Падение напряжения на тиратроне при токе 5 кА длительностью 300 нс на полке импульса составляет  $\sim 500$  В, при токе 10 кА  $\sim 1000$  В, что меньше, чем у классических тиратронов в режимах с субмикросекундной длительностью импульса тока.

Было исследовано поведение тиратрона при прикладывании к аноду импульса обратной полярности напряжением порядка 20 кВ длительностью до 300 нс через  $2 \div 10$  мкс после начала импульса прямого тока величиной до 10 кА длительностью до 300 нс. Для испытаний тиратрона по обратной электрической прочности использовалась схема без включения магнитного вентиля (см. рис. 1).

На рис. 3 представлена временная диаграмма напряжения и тока нагрузки. В интервале  $t_0-t_1$  открыт ключ Л1 и к нагрузке приложено рабочее напряжение  $U_H$ . Во время паузы между импульсами ( $t_1-t_2$ ) через тиратрон Л1 в прямом направлении протекает ток размагничивания индуктора ( $I_{разм}$ ), который перезаряжает ФЛ-1 до определенного напряжения  $U_{ФЛ-обр}$ . В момент, когда индуктор насыщается в обратном направлении ( $t_2$ ), напряжение перезаряда ФЛ-1 прикладывается к аноду тиратрона с отрицательным потенциалом, что может приводить

к пробую тиратрона. Было выявлено, что при  $|U_{\text{ФЛ-обр}}| \leq 4$  кВ тиратрон выдерживает обратное напряжение без пробоя.

При запуске Л2 и разряде линии ФЛ-2 на нагрузке с заданной задержкой возникает второй импульс рабочего напряжения  $U_H$  (момент  $t_3$ ), что вызывает на тиратроне Л1 дополнительное обратное падение напряжения. Таким образом, суммарное отрицательное напряжение, которое прикладывается к тиратрону Л1, составляет

$$U_{\text{T-обр}} = U_{\text{ФЛ-обр}} + U_H.$$

Обратное напряжение  $U_{\text{T-обр}}$ , возникающее на аноде в момент  $t_3$ , может приводить к пробую тиратрона. Ниже приведена зависимость амплитуды модуля обратного пробивного напряжения  $U_{\text{T-обр-проб}}$  от длительности интервала между импульсами

$$Dt_{2\text{имп}} = t_3 - t_0$$

при разных значениях прямого анодного тока ( $I_a$ ), для двух модификаций тиратрона:

$Dt_{2\text{имп}}$ , мкс	$ U_{\text{T-обр-проб}}  / I_a$ , кВ / кА	
	ТПИ1-10к/50	ТПИ5-10к/50
2,6	12,3 / 3,8	24 / 7
3	17,9 / 5,8	—
3,5	18,5 / 6,2	26 / 7,5
4	15,3 / 7,5	28 / 8,5
5	19 / 7,5	—
6	> 24 / 10	—
7	> 24 / 10	—
8	> 24 / 10	—

Значение анодного тока варьировалось в зависимости от величины зарядного напряжения ФЛ и значения сопротивления нагрузки. Следует учитывать, что величина  $Dt_{2\text{имп}}$  включает в себя промежуток времени, в течение которого тиратрон проводит ток в прямом направлении ( $t_0-t_2$ ) и в течение которого нельзя говорить о восстановлении тиратроном обратной электрической прочности.

В целом, можно сделать вывод, что тиратрон тем быстрее восстанавливает обратную электрическую прочность, чем меньший анодный ток коммутируется в прямом направлении. Отмечено также, что на скорость восстановления обратной электрической прочности тиратрона не оказывают существенного влияния следующие факторы:

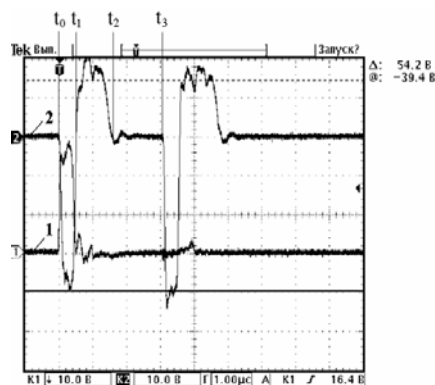


Рис. 3. Экспериментальные формы импульсов на нагрузке: 1 – ток тиратрона Л1; 2 – напряжение на нагрузке (шкала времени: 1 мкс/клетка; шкала напряжения: 2 250 В/клетка; шкала тока: 1 200 А/клетка)

1) прикладывание к сетке G2 тиратрона отрицательного напряжения в интервале времени  $t_1-t_3$ , напряжение подавалось от источника напряжения 300 В через малое ограничительное сопротивление (5 Ом);

2) переход с постоянного вспомогательного разряда  $U_{\text{DAD}}$  на импульсный вспомогательный разряд, напряжение питания  $U_{\text{DAD}}$  отключалось в момент отпирания тиратрона ( $t_0$ );

3) замыкание электрода предыонизации G1 через малое сопротивление (5 Ом) на катод в момент отпирания тиратрона ( $t_0$ ) с целью ускорения процесса рассасывания носителей заряда;

4) установка выравнивающего RC делителя на систему электродов анод-градиент-катод (см. рис. 2).

В то же время было замечено, что после протекания прямого анодного тока в момент приложения к тиратрону отрицательного анодного напряжения величиной несколько киловольт напряжение на градиентном электроде ( $U_{\text{Gr}} - U_c$ ) составляет несколько сотен вольт. Это свидетельствует о том, что нижняя часть анодной камеры, ограниченная градиентным электродом, за счет близости источника носителей зарядов (полого катода) находится в проводящем состоянии и не держит полное обратное напряжение. Это приводит к тому, что в течение первых нескольких микросекунд практически все отрицательное анодное напряжение прикладывается к верхней части анодной камеры ( $U_{\text{Gr}} - U_a$ ). В связи с этим была разработана специальная пентодная конструкция тира-

трона с дополнительной сеткой G3 (рис. 4), которая экранирует объем анодной камеры от полости катода, за счет чего создаются условия для более быстрого восстановления электрической прочности камеры  $U_{Gr}-U_{G3}$ .

Испытания пентодного тиратрона ТПИ5-10к/50 в схеме импульсного модулятора (см. рис. 1) подтвердили его улучшенные характеристики по восстановлению обратной электрической прочности (см. табл.). В частности, пентодный тиратрон выдерживает обратное напряжение порядка 24 кВ уже через 2,2 мкс с момента начала коммутации прямого анодного тока 7 кА, а через 4 мкс

тиратрон выдерживает обратное напряжение 28 кВ после коммутации тока 8,5 кА (рис. 5). Измерение коммутационных характеристик тиратронов ТПИ5 показали некоторое ухудшение параметров стабильности отпирания – возрастание джиттера до 5–10 нс. По остальным параметрам тиратроны ТПИ5 и ТПИ1 практически идентичны. В целом, можно заключить, что пентодная конструкция тиратрона выглядит перспективной для использования в схемах, где требуется сверхбыстрое восстановление обратной электрической прочности ключа.

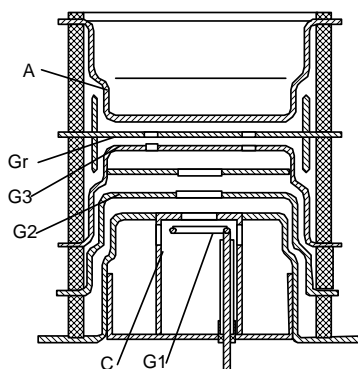


Рис. 4. Конструкция пентодного тиратрона ТПИ5-10к/50 (здесь G3 – дополнительная экранирующая сетка)

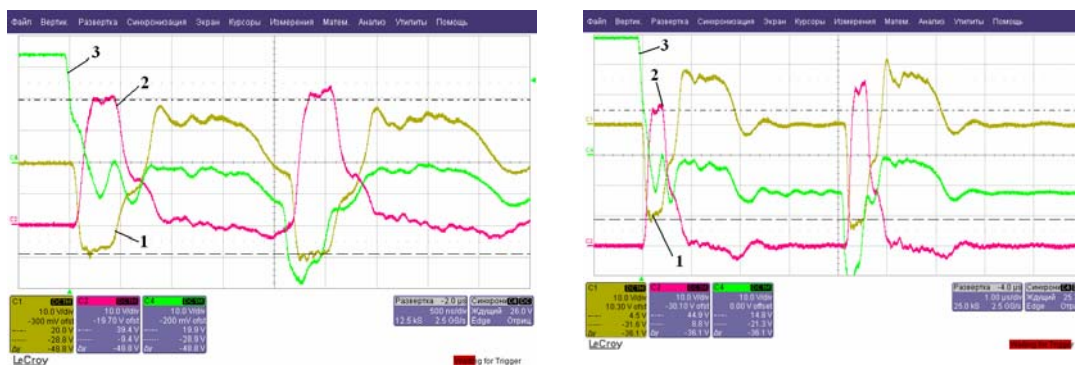


Рис. 5. Экспериментальные формы импульсов на нагрузке: 1 – напряжение на нагрузке; 2 – ток нагрузки; 3 – напряжение на аноде тиратрона Л1 (Шкала времени: 0,5 мкс/клетка (а) и 1 мкс/клетка (б); шкала напряжения: 5 700 В/клетка и 10 000 В/клетка для кривых 1 и 3 соответственно; шкала тока: 1 200 А/клетка)

## Заключение

Тиратроны с холодным катодом ТПИ1-10к/50 при коммутации импульсных токов до 10 кА имеют ряд преимуществ по сравнению с накаливаемыми водородными тиратронами:

- отсутствие мощных цепей накала;
- малые времена развития разряда и восстановления электрической прочности;
- малые габариты и вес;
- относительно малая стоимость.

Отсутствие накаливаемого катода обеспечивает тиратрону более однородное распределение плотности газа по объему прибора и, следовательно, меньшее время коммутации. При этом упрощается конструкция прибора, убирается дополнительный источник питания и тепловыделения, отпадает потребность в охлаждении.

С учетом специфических требований к приборам по обратному напряжению, разработана пентодная конструкция тиратрона ТПИ5-10к/50, позволяющая сократить время восстановления обратной электрической прочности.

С другой стороны, можно отметить следующие ограничения в работе тиратронов ТПИ1(5)-10к/50:

- средний ток не более 300 мА;
- необходимость подстройки режима генератора водорода со временем.

Можно заключить, что тиратроны ТПИ-типа, в частности ТПИ1-10к/50, являются достойной альтернативой имеющимся силь-

ноточным ключам, превосходя их по многим показателям.

## Список литературы

1. Cook E. G., Akana G., Gover E. J. *et al.* Solid-state modulators for RF and fast kickers// Proceedings of the 2005 Particle Accelerators Conference. Knoxville, Tennessee, USA, 2005. P. 637–641.
2. Nguyen M. N., Cassel R. L. High power switch for the SMTF modulator // Proceedings of the 2007 Particle Accelerators Conference. Albuquerque, New Mexico, USA, 2007. P. 2445–2447.
3. Cassel R., Hitchcock Sh. A new type high voltage fast rise/fall time solid state Marx pulse modulator// Proceedings of the 2007 Particle Accelerators Conference. Albuquerque, New Mexico, USA, 2007. P. 865–867.
4. Bochkov V. D., Dyagilev V. M., Ushich, V. G. *et al.* Sealed-off pseudospark switches for pulsed power applications (Current status and prospects) // Plasma Science. IEEE Transactions on. 2001. Vol. 29. No. 5. P. 802–808.
5. Akimov A. V., Bak P. A., Kazarezov I. V. *et al.* Investigation of cold cathode TPI1-10k/50 thyatron parameters at voltage up to 50 kV, current up to 10 kA, pulse duration of hundred nanoseconds // Problems of Atomic Science and Technology. Series: Nuclear Physics Investigations. 2006. No. 3(47). P. 92–94.

Материал поступил в редколлегию 25.09.2008

A. V. Akimov, P. A. Bak, A. A. Korepanov, P. V. Logachev, V. D. Bochkov,  
D. V. Bochkov, V. M. Dyagilev, V. G. Ushich

### Application of Unheated Cathode Thyratrons for High-Voltage High Current Pulse Series Formation

The circuit of modulator, serving to supply inductive-resistive load in double-pulse mode with currents up to 10 kA and pulse duration of 300 ns, is described. As switching components unheated cathode thyratrons (pseudospark switches) TPI1-10k/50 and TPI5-10k/50 with anode voltage up to 50 kV have been used. The results of tests, confirming possibility of the thyatron reverse dielectric strength recovery within some microseconds after switching of 10 kA forward anode current, are presented.

*Keywords:* pulse forming, thyatron, unheated cathode, dielectric strength, recovery time.