

## ИССЛЕДОВАНИЕ ТИРАТРОНОВ НОВОГО ПОКОЛЕНИЯ НА КОММУТИРУЕМУЮ СРЕДНЮЮ МОЩНОСТЬ ДО 0,5 МВт. ОПЫТ РАБОТЫ В ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКОЙ АППАРАТУРЕ

*В. Д. Бочков<sup>a,1</sup>, Д. В. Бочков<sup>a</sup>, И. А. Сальнов<sup>a</sup>, В. Н. Николаев<sup>a</sup>,  
А. С. Крестьянинов<sup>b</sup>, С. Ю. Соковнин<sup>c</sup>, М. Е. Балезин<sup>c</sup>, А. З. Позинковский<sup>z</sup>*

<sup>a</sup> ООО «Импульсные технологии», Рязань, Россия

<sup>b</sup> Научно-исследовательский институт электрофизической аппаратуры им. Д. В. Ефремова, Санкт-Петербург, Россия

<sup>c</sup> Институт электрофизики УрО РАН, Екатеринбург, Россия

<sup>z</sup> Филиал МКБ «Горизонт» НПЦГ «Салют», Дзержинский, Россия

Проведен анализ конкурентоспособности тиратронов по отношению к новейшим твердотельным приборам. Представлены конструктивные особенности и параметры ряда новых ТГИ-тиратронов с накаливаемым комбинированным катодом на основе импрегнированного на рабочие напряжения 30, 50 и 75 кВ, среднюю коммутируемую мощность от 150 до 500 кВт и импульсную до 250 МВт. Металлокерамические тиратроны имеют тетродную конструкцию и воздушное охлаждение. Основная область применения — мощная электрофизическая аппаратура, в частности, даны примеры их использования в качестве модуляторов ускорителей, а также в источниках питания импульсной короны для систем очистки воздуха от сероводорода, аммиака и других вредных газов в стримерном коронном разряде.

The analysis of competitiveness of thyratrons in relation to up-to-date solid-state devices has been carried out. The design features and parameters of a number of new TGI thyratrons with a hot combined impregnated cathode for operating voltages of 30, 50 and 75 kV, average switching power from 150 to 500 kW and pulsed power to 250 MW are presented. Thyratrons have a tetrode design in the metal ceramic version and air cooling. The main field of application is high power electrophysical equipment; in particular, examples are given of using thyratrons in accelerators as modulators as well as in pulse corona power supplies for air purification systems from hydrogen sulfide, ammonia and other harmful gases in the streamer corona discharge.

PACS: 84.32.Dd

### ВВЕДЕНИЕ

Импульсные коммутаторы — водородные тиратроны — известны с 1940-х гг. [1]. Они нашли множество применений в импульсной энергетике, включая такие области с большой потребностью, как радары, ускорители различных типов, лазеры и пр. Для тиратронов с ненакаливаемым катодом ТДИ- и ТПИ-типов (pseudospark switches) открыли новые

---

<sup>1</sup>E-mail: pulsetech@mail.ru

области применения [2]: в радиографических комплексах, кикерах ускорителей, импульсных термоядерных коллайдерах, плазмафокусных установках, в ударно-волновых, магнитно-импульсных технологиях и пр. Перспективно применение в лазерах на свободных электронах на частотах до 100 кГц. В данной работе обсудим применение тиратронов в ускорительной технике: модуляторах, кикерах, а также в генераторах плазмы.

В последние десятилетия в силу разных причин, как объективных, так и субъективных, в том числе и из-за неправильного применения, тиратроны вытесняются твердотельными коммутаторами (ТТК). Уже с 1960-х гг. стали появляться предсказания о полной замене ими тиратронов. В публикациях за 2015 г. такие заявления повторяются [3, 4]. Мы попытаемся показать, что для большинства претензий к тиратронам нет оснований. В работе [3] в качестве недостатков тиратронов необоснованно отмечается: «Тиратроны имеют относительно короткое время службы (несколько сотен часов)». В работе [4] показаны параметры более объективно, но отмечена высокая стоимость замены, долгое время включения и необходимость регулярной коррекции (ganging) для поддержания малого джиттера и времени дрейфа запаздывания. При этом Silicon Power Corp. рекламирует сверхбыстрый твердотельный тиратрон (SSTIR модель S56-12) для замены классических тиратронов и игнитрона. С переключателем SSTIR на основе Si и SiC второго поколения сравнивается дейтериевый мощный тиратрон с полым анодом CX1925X на рабочее напряжение до 60 кВ, пиковый ток до 15 кА, при среднем 5 А (частота до 2 кГц). SSTIR показывают времена переключения менее 100 нс, имеют  $di/dt = 100$  кА/мкс, работают более 10 тыс. ч и способны пропускать обратный ток, джиттер составляет  $\pm 10$  нс. Тиратрон CX по данным [4] имеет срок службы не менее 13 тыс. ч. По данным изготовителя, тиратрон CX имеет  $di/dt$  до 300 кА/мкс, джиттер 1,0 нс, причем еще меньший может быть получен при питании накала от источника постоянного тока, использования двойного импульсного управления и пр.

Как видно, большинство из показанных разработчиками преимуществ и возможностей ТТК, а также недостатков тиратронов имеют чисто рекламный характер. Реально не предоставлено достаточно достоверных данных по ресурсам в одинаковых условиях работы ТТК. Разработчики твердотельных коммутаторов, определяя срок службы тиратрона в сотню часов [3], неправомочно берут данные по режимам коммутации в наносекундном диапазоне длительностей, т. е. при высоких скоростях коммутации в диапазоне мощностей, не достижимых для ТТК. Имеющаяся большая статистика [5, 6] работы тиратронов производства различных компаний показывает, что тиратроны с накаливаемым катодом имеют реальный срок службы в модуляторах ускорителей при микросекундных длительностях не сотни, а от десятков тыс. до 120 тыс. ч. Данные [5, 6] показывают высокие потенциальные возможности тиратронов.

Во-первых, разброс ресурсов можно уменьшить, одновременно увеличивая наработку при совершенствовании технологии и наличии системы мониторинга [6] их параметров. Например, современные средства позволяют легко осуществить автоматическую регулировку времени запаздывания и джиттера за счет обратной связи с цепями накала резервуара. Система, рекомендуемая компанией «e2v technology», имеет не менее трех возможных корректировок питания в контурах резервуара водорода и катода, позволяющих компенсировать проблемы синхронизации.

Во-вторых, тиратроны Wagner с 35 % от общего числа находящихся в эксплуатации тиратронов СН1191, включая несколько приборов, которые использовались более 20 лет,

показали более 17,5 млн ч работы! Дополнительно срок службы можно увеличить в разы, заменяя у отработавших тиратронов катодный узел вместе с резервуарами водорода. Эта операция стоит около 20 % от цены нового тиратрона.

В-третьих, во второй части доклада [4] показано, что для достижения крутизны тока, близкой к  $di/dt$  тиратрона, требуется применить крупногабаритный дроссель насыщения, при этом потери в такой схеме больше, чем у тиратрона. Нужно иметь в виду, что ТТК работал в облегченном режиме с нелинейной индуктивностью (saturating anode inductor) и с уменьшенными емкостями в первых ячейках ФЛ.

В-четвертых, во всех этих публикациях не упоминается один из основных аспектов применения приборов — стоимость. А как известно, стоимость сборок из твердотельных элементов в несколько раз превышает стоимость тиратронов.

В-пятых, одним из недостатков тиратрона производителями ТТК является ранжирование (ganging) — процедура корректировки оптимального давления тиратрона, относительно трудоемкая часть при обслуживании модулятора. Однако, по данным SLAC, это происходит раз в два года. К тому же имеются несколько способов облегчить процедуру. Автоматическое отслеживание влияния оптимального давления на изменения условий нагрева обеспечивается в тиратроне E2V, который имеет температурно-чувствительную схему регулирования (барретер) в основании трубки. Необходимо сказать, что автоматизация ранжирования при мониторинге времени запаздывания — метод, предлагаемый нами, — более эффективен и точен. В настоящее время он прорабатывается для нескольких целей — индикации работоспособности тиратрона в аппаратуре при «спящем режиме» и с мгновенной готовностью, а также для обычного ранжирования.

В ООО «Импульсные технологии» разработана и производится линейка новых ТГИ-тиратронов, в которых используется комплексный эмиттер, состоящий из импрегнированного накаливаемого алюмосиликатного вольфрамового катода и полого ненакаливаемого катода, обеспечивающего большие средние токи (до 10 А). Площадь рабочей поверхности накаливаемого катода (10 модулей) — 57,4 см<sup>2</sup>, площадь холодного — 123,5 см<sup>2</sup>. Номинальный токосъем с такого катода — порядка 100 А/см<sup>2</sup> (с оксидного — максимум 10 А/см<sup>2</sup>). Области применения новых коммутаторов показаны в следующем разд.

### **НОВЫЕ ТИРАТРОНЫ ООО «ИМПУЛЬСНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ» ДЛЯ РЕЖИМОВ СУБМИКРОСЕКУНДНОЙ ДЛИТЕЛЬНОСТИ ИМПУЛЬСОВ, ПРИМЕНЯЕМЫЕ В РАДИАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЯХ**

Ускорители электронов серии УРТ разработки ИЭФ УрО РАН [7], созданные по схеме тиратрон–импульсный трансформатор–полупроводниковый прерыватель тока (рис. 1), в значительной мере удовлетворяют требованиям экономичности, стабильности параметров и надежности, простоты в обслуживании и ремонте при относительно невысокой цене. УРТ-1М-300 обеспечивает ускоряющее напряжение до 1 МВ, мощность пучка электронов 6 кВт, длительность импульса 100 нс и частоту повторения импульсов до 300 Гц. Создана система автоматизированного управления и мониторинга параметров по оптоволокну. Для получения электронного пучка шириной до 400 мм использован металлодиэлектрический катод из нескольких элементов с неравномерностью распределения плотности тока пучка электронов на выходной фольге ~ 15 %.

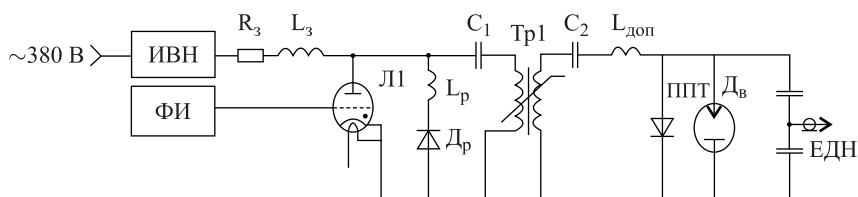


Рис. 1. Схема ускорителя УРТ-1: ИВН — источник высокого напряжения; ФИ — формирователь импульсов запуска; ППТ — полупроводниковый прерыватель тока; ЕДН — емкостный делитель напряжения; Л1 — тиратрон; Тр1 — импульсный трансформатор; Др — диод рекуперации; Дв — вакуумный диод;  $L_3$ ,  $L_p$ ,  $L_{доп}$  — индуктивности зарядная, рекуперации и дополнительная соответственно;  $C_1$  и  $C_2$  — емкости первого и второго контуров

Для коммутации используется тиратрон ТГИ2-5к/75 на рабочее напряжение до 75 кВ производства ООО «Импульсные технологии» (Рязань). Тиратрон имеет тетродную конструкцию в металлокерамическом исполнении с тремя высоковольтными секциями и комплексным катодом, который состоит из «холодного» полого и накаливаемого эмиттера. Тиратрон устойчиво работает с середины 2015 г. при зарядном напряжении до 65 кВ.

Другой пример — применение тетродного дейтериевого тиратрона ТГИ2-5к/50П с импрегнированным катодом и полым анодом в установках «Корона», серийно выпускаемых ФМКБ «Горизонт». Низкотемпературная неравновесная плазма создается в реакторных камерах с коаксиальным расположением электродов. Установки используются для очистки воздуха от экологически вредных газообразных примесей, мелкодисперсных аэрозолей и запахов на промышленных предприятиях и в коммунальных службах, в частности, круглосуточно работают при очистке воздуха на крупнейших в Европе кана-

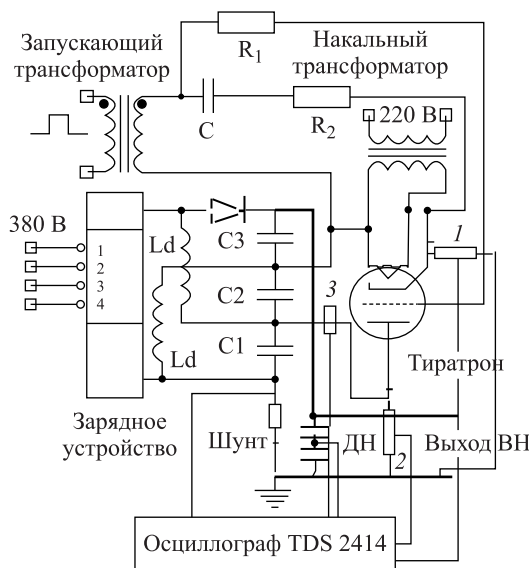


Рис. 2. Принципиальная схема генератора Фитча: 1, 2 — делители напряжения Tektronix P6015A; 3 — пояс Роговского СТЗ-0.1; ДН — делитель напряжения ДНВ-80И

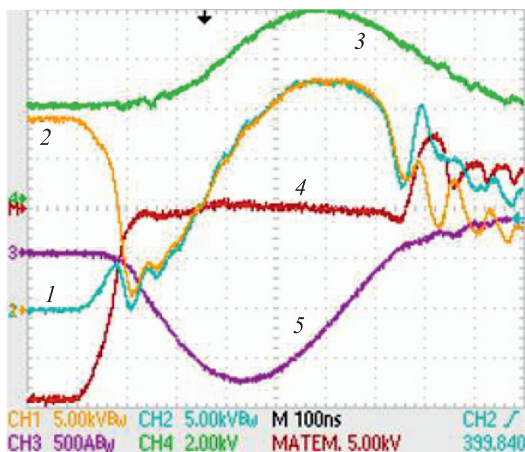


Рис. 3. Осциллограммы напряжения на катоде  $U_k$  (1) и аноде  $U_a$  (2); выходной импульс  $U_{p1}$  (3); разность  $U_a - U_k$  (4); ток через тиратрон  $I_{tr}$  (5)

лизационных насосных станциях — Курьяновских и Люберецких сооружениях очистки вод г. Москвы. Степень очистки 80–95 % при расходе газа от 5 до 15 м<sup>3</sup>/ч.

В установке используется трехступенчатый генератор Фитча (рис. 2). Генерация импульса происходит за счет полного коммутационного переворота напряжения на средней ступени С2 (рис. 3) при срабатывании тиратрона. Отметим, что тиратрон ТГИ2-5к/50П обеспечивает в аналогичном режиме срок службы существенно выше, чем ТГИ1-1000/25 — один из лучших разработанных в СССР тиратронов (соответственно 4–6 месяцев и всего несколько часов).

### ТИРАТРОНЫ В РЕЖИМАХ С МИКРОСЕКУНДНОЙ ДЛИТЕЛЬНОСТЬЮ ИМПУЛЬСОВ ТОКА

В линейном ускорителе электронов УЛЭ10-10С (разработки НИИЭФА им. Д. В. Ефремова) тиратрон ТГИ2-10к/50 используется как коммутирующий элемент в схеме импульсного модулятора СВЧ-генератора. Зарядное напряжение на аноде тиратрона — 25–30 кВ, амплитуда импульсного тока тиратрона — 1200 А, длительность импульса — 20 мкс. Для управления тиратроном используется стандартный блок ПБ-7Н производства ООО «Импульсные технологии». Напряжение накала генератора водорода — 5,7 В, геттера — 6,3 В. Напряжение накала катода тиратрона подается от отдельного источника и равно 6,3 В, ток накала 50 А, частота следования импульсов тока до 250 Гц. Другой режим работы — длительность импульса 12 мкс при импульсном токе 1200 А и частоте 300 Гц. Тиратрон помещен в бокс, где охлаждается воздухом, поток которого направлен на радиаторы катода, сеток 1, 2, градиентной сетки и анода. Прибор работает круглосуточно в ускорителе с ноября 2016 г.

В данной работе сделана попытка показать, что для большинства претензий к тиратронам нет оснований. Все вышесказанное указывает на то, что рано списывать со счетов тиратроны. Мы не сомневаемся в их перспективах и ведем постоянную работу по

совершенствованию тиратронов, а также схем и способов эксплуатации, что обеспечит устойчивую потребность в тиратронах для различных устройств, как в новых разработках, так и в уже существующей аппаратуре [2].

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Gas Discharge Closing Switches. Advances in Pulsed Power Technology / Eds.: G. Schaefer, M. Kristiansen, A. Guenther. New York: Plenum, 1990.
2. *Bochkov V. D., Bochkov D. V., Dyagilev V. M., Panov P. V., Teryoshin V. I., Vasiliev I. V., Ushich V. G.* Development of High-Power Gas Discharge and Electronic Vacuum Devices for Pulsed Electrophysics. Current Status and Prospects // 11th Intern. Conf. on Open Magnetic Systems for Plasma Confinement, Novosibirsk, Russia, 2016. AIP Conf. Proc. 2016. V. 1771. P. 070005.
3. *Waldron J., Brandmier K., Temple V.* Ultra-Fast, High Reliability Solid State Thyatron, Ignitron and Thyristor Replacement. IEEE PPC. 2015.
4. *Saerthre R., Morris B., Sanders H.* Thyatron Replacement for the Spallation Neutron Source Linac Extraction Kicker PFN Systems. IEEE PPC. 2015.
5. *Ficklin D. B., Jr.* A History of Thyatron Lifetimes at the Stanford Linear Accelerator Center. SLAC-PUB-6543. 1994.
6. *Oh J. S., Namkung W., Matsumoto H.* Lifetime Issue of a Thyatron for a Smart Modulator in the c-Band Linear Collider // Proc. of APAC 2004, Gyeongju, Korea, 2004. P. 767–769.
7. *Соковнин С. Ю., Балезин М. Е., Щербинин С. В.* Ускоритель УРТ-1М-300 для радиационных технологий // Изв. вузов. Физика. 2014. Т. 57, № 11/3. С. 297–301.