

ВЛИЯНИЕ ПРОВОДЯЩИХ ЭКРАНОВ НА СТАБИЛИЗАЦИЮ ПЛАЗМЕННЫХ КАНАЛОВ С ТОКАМИ В СОТНИ КИЛОАМПЕР

В. Д. Бочков^{а,1}, Д. В. Бочков^а, С. И. Кривошеев^б, Ю. Э. Адамьян^б

^а ООО «Импульсные технологии», Рязань, Россия

^б Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
Санкт-Петербург, Россия

На основе опытных данных проанализированы результаты влияния внешних проводящих экранов на стабилизацию плазменных каналов в мощных тиратронах ТДИ-типа (pseudospark switches). Исследованы как неферромагнитные, так и ферромагнитные экраны. Представлен предварительный расчет магнитных полей. Работа является этапом исследований по повышению коммутационных возможностей тиратронов с токами в сотни килоампер при коммутуруемой энергии свыше 50 кДж.

Based on experimental data, we analyzed the results of the influence of external conductive shield on stabilization of plasma channels in high-power pseudospark switches — thyratrons of TDI type. Both no-ferrous and ferrous shields are tested. The research is a part of a work on improvement of switching capabilities of thyratrons capable of transferring currents up to hundreds of kA with switching energy more than 50 kJ.

PACS: 84.32.Dd

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Тиратроны ТДИ-типа (pseudospark switches) широко распространены в установках импульсной энергетики [1]. Обычно они работают в схемах с заземленной сеткой и, по сути, являются дуговыми разрядниками, срок службы которых в основном определяется эрозией электродов [2]. Однако опыт показывает, что ТДИ-тиратроны, конструкция и электропрочность которых обусловлена левой ветвью кривой Пашена, имеют особенности движения дуги при коммутации заряда более 0,1 Кл/имп. и токов более 10 кА. Весьма существенно на их ресурс влияет способ подключения в коммутуруемую схему. На рис. 1 можно видеть эрозию внутренних частей электродов тиратрона ТДИ1-150к/25, обусловленную движением дуги при различном подключении к нагрузке.

Наработка в режиме 20 кВ, 30–40 кА, 12 мкФ, 1–2 Гц с длительностью импульса 30 мкс сначала велась при симметричном (около 50 тыс. имп.), а затем несимметричном (~ 10 тыс. имп.) подключении к нагрузке. Тиратрон вышел из строя из-за разгерметизации. На рис. 1 заметно, что начальная эрозия (четыре точечных ямки, отмеченных малыми окружностями) шла в штатном режиме равномерно и соосно четырем отверстиям

¹E-mail: pulsetech@mail.ru

инжекции из катода. В дальнейшем после изменения подключения горение разряда началось в нештатном режиме — основной объем эрозии происходил на границе плоской и цилиндрической частей анода и его экрана, что привело к оплавлению в канале дуги экрана и катодной части, сквозному проплавлению анода и разгерметизации тиратрона (обведено овалом на рис. 1).

Для стабилизации горения применяется симметрирование токосъема, т.е. внешние проводники располагают как минимум с двух, четырех, шести и т.д. противоположных сторон фланцев тиратронов (рис. 2).

При этом эрозия плоской рабочей поверхности электродов невелика, ресурс вырабатывается не более чем на доли процента, что дает основание ожидать значений срока службы тиратронов, достаточных для многих применений. К сожалению, такие сроки на практике не достигаются в случае упрощенного подхода к компоновке тиратронов в схеме. При коммутации заряда более 1 Кл/имп. и токов более 50 кА (энергия более 10 кДж), особенно в режимах с осцилляцией, схемы включения, показанной на рис. 2, оказывается недостаточно и дуга выбрасывается на периферию электродов, приводя к катастрофическим для прибора последствиям.

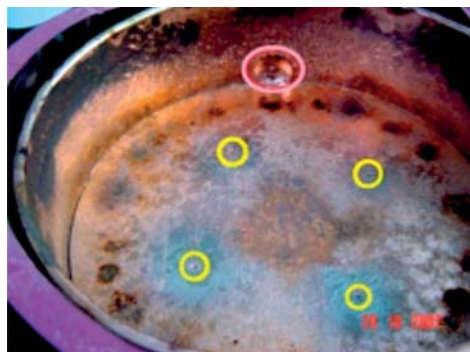


Рис. 1. Внутренняя рабочая часть анода тиратрона ТДИ1-150к/25 после испытаний

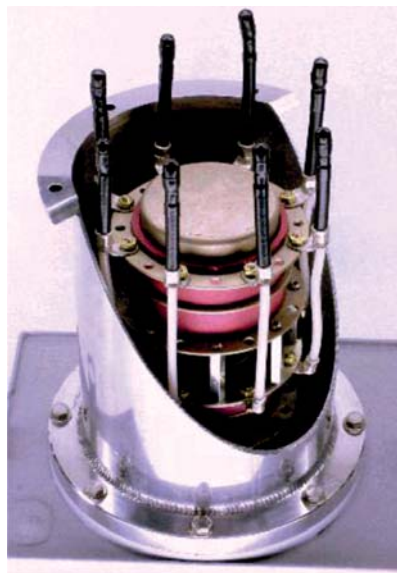


Рис. 2. Демонстрационный макет включения тиратронов (прямой и защитный — кроубарный) в симметричную линию коаксиальных кабелей с помещением в алюминиевый экран (кабели и часть экрана обрезаны) [3]



Рис. 3. Следы эрозии поверхности катода при симметрировании токоподводов по окружности фланцев



Рис. 4. Компоновка тиратронов с ферромагнитным экраном толщиной 9 мм в энергетической установке питания импульсного плазмотрона

На рис. 3 показаны следы эрозии поверхности электродов при улучшенном симметрировании токоподводов по окружности фланцев. Можно видеть, что следы от дуговых каналов перемещались в пределах, близких к диаметру, на котором располагались инжекционные отверстия, причем достаточно упорядоченно, укладываясь в крестообразных дорожках.

На рис. 4 показана компоновка тиратронов в энергетической установке питания мощного импульсного плазмотрона [4] с двумя тиратронами водяного охлаждения ТДИ1-200к/25ПВ, работающими параллельно. Тиратроны помещены в стальные трубы-экраны, состоящие из трех частей, коммутируют емкость 1,2 мФ (до 20 кДж) при среднем токе до 10 А. Экраны не участвуют в коммутации токов, находятся под потенциалом экранов коаксиальных кабелей. Симметрично подключены четыре анодных и четыре катодных кабеля (на фото показан только один). Важно, что экранируется действие как магнитных полей соседнего тиратрона, так и внешних цепей тока.

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ СТРУКТУРЫ ТОКОРАСПРЕДЕЛЕНИЯ И ВНЕШНИХ МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ НА РАБОТУ ТИРАТРОНА

Вопрос стабилизации плазменных структур весьма актуален в установках низко- и высокотемпературной плазмы, в частности в термоядерном эксперименте, и для его решения разрабатываются специальные токовые конфигурации и магнитные системы. Однако имеющиеся решения требуют создания сложных магнитных полей и больших затрат энергии. В отношении тиратронов, работа которых характеризуется наличием обычно нескольких сильноточных плазменных каналов, этот вопрос целенаправленно не исследовался. Наибольшие неприятности при работе тиратронов с высокими значениями коммутируемого заряда происходят от смещения дуговых каналов на периферию прибора — к керамической стенке, последующего нагрева и испарения керамики, плавления боковых поверхностей высоковольтных электродов, сопровождающегося резким снижением электропрочности. Мы полагаем, что это определяется влиянием силы Ампера–Лоренца при взаимодействии магнитных полей токов проводимости по электродам тиратрона с каналом дуги, аналогично приборам плазменного фокуса и плазменным пушкам (plasma driven electromagnetic launcher).

В последнее время получены данные о длительной коммутации энергии ТДИ-тиратронами в различных установках. Во всех случаях обязательным условием являлся монтаж тиратронов с помещением их в экранирующий корпус из проводящего материала, который может также являться (в случае хорошо проводящего металла — меди или алюминия) коаксиальным обратным проводником, снижающим индуктивность сборки. Мы не нашли описания этих явлений в литературе, что дало основание к проведению исследований, направленных на повышение надежности тиратронов при высоких значениях коммутируемой энергии.

Реально токи I_{an} , текущие в электродах, могут быть неодинаковы и иметь разные направления. Кроме того, токораспределение по каналам определяется не только сопротивлением дуг и контактных зон, формируемых при подключении токоподводов к электродам, но и разновременностью движения проводящих каналов в процессе коммутации. Решение такой задачи в полной постановке весьма сложно. Для упрощения применен принцип суперпозиции и предполагается, что отвод токов от тиратрона полностью симметричен и нет неоднородностей плотностей токов по окружности фланцев. При этом токи, текущие равномерно и симметрично, компенсируют друг друга и не будут влиять на смещение дуг, поэтому их можно не учитывать. Полагаем, что только токи дуги нестабильны и задача при их неоднородности — создать дополнительные силы, удерживающие дуговые каналы в пределах плоской части электродов.

Для анализа влияния гетерогенности токов, протекающих через электроды на каналы плазменной дуги, они представлены в виде набора полос с токами $I_a = \Sigma I_{an}$. На рис. 5 схематически показано направление действия сил Лоренца F_{L1} и F_{L2} на каналы дуг от коммутируемых тиратроном токов I_{a1} и I_{a2} на противоположных по диаметру сторонах электродов.

В металлическом экране при прохождении через тиратрон анодного тока I_a наводятся индукционные токи $I_i = I_{i1} + I_{i2} + \dots = \Sigma I_{in}$. Если дуговой канал, например I_{a1} , в месте горения разряда в промежутке анод–катод будет двигаться (например, под действием силы Лоренца вправо), приближаясь к экрану, то при этом будут увеличиваться отталкивающие силы между токами I_{an} и I_{in} , приводя к автоматической стабилизации положения дуговых каналов вблизи осевой линии тиратрона.

Для экранировки обычно применяют алюминиевые экраны. Однако такие экраны, помогая при относительно малых коммутируемых зарядах, при больших мало влияют на выброс дуги. Мы полагаем, что более выгодно использование экранов из ферромагнитных материалов (сталь). В отличие от неферромагнитных материалов — алюминия или меди, механизм экранирования которых связан с генерированием вихревых токов, ферромагнитный материал создает дополнительный механизм экранирования: захватывает в себя магнитные силовые линии внешнего поля, «шунтируя» экранируемые области. Это

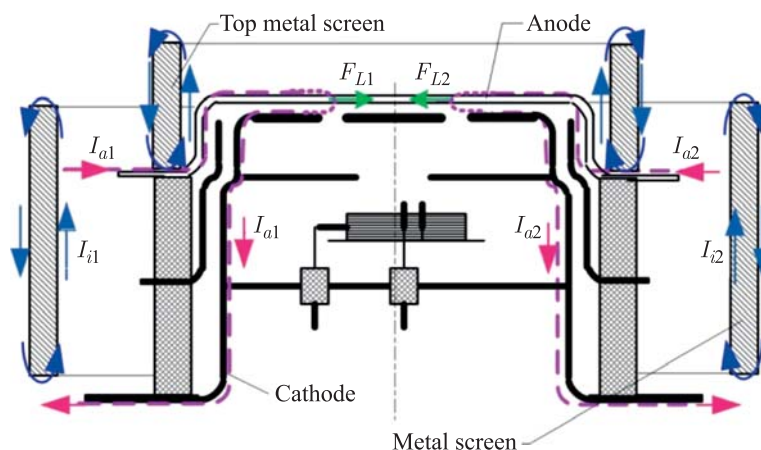


Рис. 5. Схема ТДИ-тиратрона с экранами

экранирование является квазистатическим и наиболее эффективно проявляется при сравнительно медленных процессах, связанных с коммутацией больших энергий (зарядов).

Была рассчитана в трехмерной постановке модельная задача об экранировании внешнего магнитного поля \mathbf{B}_e цилиндрическим экраном из ферромагнитного и неферромагнитного проводящего материала. Рассматривалась задача с разным направлением внешнего поля относительно оси цилиндра (рис. 6).

Следует обратить внимание, что нормальная компонента магнитного поля ферромагнитным экраном экранируется сильнее, чем просто проводящим. Для продольной компоненты только на оси системы соотношение степеней экранирования перестает быть таким же, как и для поперечной. Однако по мере удаления от оси, т. е. при приближении к стенкам, экранировка улучшается. При этом формируется пространственное распределение магнитного поля, которое может быть благоприятно с точки зрения сдерживания эффекта пинчевания токов в тиратроне.

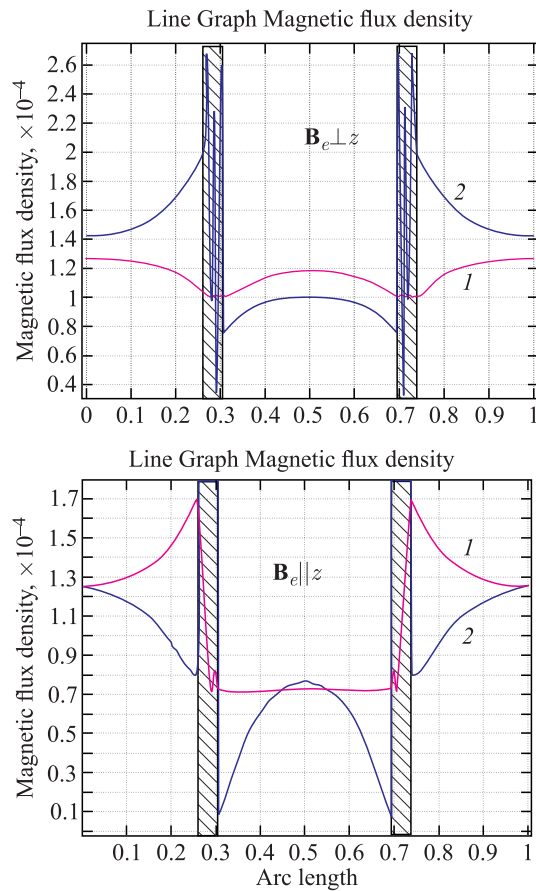


Рис. 6. Расчетные зависимости распределения плотности магнитного потока от внешнего магнитного поля \mathbf{B}_e в пространстве внутренней полости проводящего экрана (1 — неферромагнитный, 2 — ферромагнитный материал) при \mathbf{B}_e перпендикулярно и параллельно оси

ВЫВОДЫ

Предварительный анализ магнитных полей в рабочей зоне разрядника показывает целесообразность использования проводящих экранов для формирования условий стабильной работы тиратронов ТДИ-типа.

В настоящее время проходит испытание простейший вариант экрана для тиратронов ТДИ1, имеющих реэнтрантную (reentrant) конструкцию электродов, в которой разряд располагается в верхней части анодной камеры. Предполагается, что для стабилизации дуги достаточно будет одного верхнего экрана-трубы (рис. 5, «Top metal screen»). Этот экран ближе к каналам дуги, поэтому более эффективен и в то же время не требует усиления изоляции между частями снаружи тиратрона. Необходимо уточнить влияние магнитных свойств материала и толщины экрана — ведь экраны и электроды из меди (толщиной 2,5 мм) имеются внутри тиратрона, но они не оказывают заметного влияния на стабильность дуг. Детальный анализ работы тиратрона с учетом картины токов в реальной системе электродов и выбор оптимальной конструкции экрана требует более объемной работы с использованием высокопроизводительного компьютера.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бочков В.Д. и др. Мощные газоразрядные и вакуумные приборы для импульсной электрофизики. Современное состояние // XIV Харитоновские тематические науч. чтения «Мощная импульсная электрофизика», Саров, 2012. С. 343–348.
2. Бочков В.Д., Королев Ю.Д. Импульсные газоразрядные коммутирующие приборы // Энцикл. низкотемпературной плазмы / Под ред. В.Е. Фортова. Вводный том, кн. 4, разд. XI.6. М.: Наука, 2000. С. 446–459.
3. Slough J. et al. Prospective Pulsed Power Applications of Pseudospark Switches // 17th IEEE Intern. Pulsed Power Conf., Washington, DC, 2009. P. 255–259.