

**В.Д. Бочков, Н.М. Верещагин, Ф.Г. Горюнов, В.А. Крестов, М.И. Ломаев, В.Б. Меркулов, В.Ф. Тарасенко, В.Н. Шалыгин**

## **ИНДУКТИВНЫЕ НАКОПИТЕЛИ ЭНЕРГИИ, ИСПОЛЬЗУЮЩИЕ ГАЗОРАЗРЯДНЫЕ ПРИБОРЫ С ПОЛНЫМ УПРАВЛЕНИЕМ, И ИХ ПРИМЕНЕНИЕ**

Приведены схемы и результаты испытаний индуктивных накопителей энергии, использующих газоразрядные приборы с полным управлением (ГРПУ). Получены следующие наибольшие параметры: импульсы напряжения амплитудой до 100 кВ, частоты повторения до 2 кГц. Осуществлено полное управление при токах через ГРПУ до 500 А. Продемонстрирована работа азотного лазера с накачкой от индуктивного накопителя энергии с КПД от энергии, вложенной в активную среду во время импульса генерации, 0,2%.

### **1. Введение**

Индуктивные накопители энергии постоянно привлекают к себе внимание [1–3], т.к. позволяют увеличить мощность, передаваемую в нагрузку, и уменьшить размеры генератора накачки. Однако практическое использование генераторов с индуктивным накоплением энергии, особенно в промышленных устройствах, сдерживается сложностями, возникающими при создании устройств, обеспечивающих включение и обрыв токов  $\sim 1$  кА и более при частотах повторения  $10^2 - 10^3$  Гц, а также выдерживающих импульсные напряжения при обрыве тока в десятки – сотни киловольт. Весьма перспективно использовать в генераторах с индуктивным накоплением энергии для включения и выключения тока газоразрядные приборы с полным управлением (ГРПУ).

Первые сообщения о создании газоразрядных приборов, в которых возможно двустороннее управление током анода, т.е. коммутаторов, работающих на замыкание и размыкание цепи тока, появились в 1937 г. [4, 5]. В 50-х гг. эти приборы уже приобрели основные элементы, содержащиеся в конструкции современных, полностью управляемых газоразрядных приборов – таситронов (мелкоструктурную управляющую сетку, накаливаемый катод и водородное наполнение) [6–8]. Отметим, что таситроны не получили широкого распространения в технике и выпускаются только в России (НИИ газоразрядных приборов, г. Рязань) малыми партиями. Кроме таситронов можно выделить еще два типа мощных (более 100 кВт в импульсе) промышленных приборов, способных выключить ток в нагрузке при подаче управляющего импульса. Это вакуумные коммутаторы (импульсные модуляторные лампы, электронно-лучевые вентили и пролетные пентоды) и мощные транзисторы.

Основным недостатком вакуумных коммутаторов является низкий коэффициент полезного действия, обусловленный высоким значением падения напряжения на вакуумном промежутке. Особенно существенна эта важнейшая энергетическая характеристика при значениях коммутируемых токов порядка десятков и более ампер. Большие потери энергии на приборе требуют увеличения его размеров, повышения расходов охлаждающих агентов, усложнения системы питания и охлаждения, что вызывает снижение надежности аппаратуры. Для транзисторов характерны сравнительно малые скорости нарастания и обрыва тока, а также низкие по сравнению с газоразрядными и вакуумными приборами рабочие напряжения.

Кроме этих промышленных приборов существуют и другие прерыватели тока, которые используются в электрофизических установках и являются уникальными приборами, например взрывааемые проводники и плазменные прерыватели тока [1, 2, 9]. В последнее время поя-

вились сообщения о прерывателях тока на основе промышленных полупроводниковых высоковольтных диодов [3].

В данной статье приведены результаты экспериментальных исследований индуктивных накопителей энергии, использующих для включения и обрыва тока новый газоразрядный прибор с полным управлением и холодным катодом, а также данные по применению одного из генераторов с индуктивным накоплением энергии для накачки азотного лазера.

## 2. Газоразрядные приборы с полным управлением

В настоящее время имеется несколько типов газоразрядных приборов с полным управлением. Это упоминаемые выше таситроны [6–8, 13], а также использующие сверхплотный тлеющий разряд приборы с управлением внешним магнитным полем [10, 11] или электрическими импульсами, подаваемыми на мелкоячеистую, как у таситрона, сетку [1, 12]. К недостаткам таситронов следует отнести применение накаливаемого катода, а также относительно малые прерываемые токи и рабочие напряжения.

Так, у наиболее мощного таситрона ТГУ1 – 1000/25 максимальное анодное напряжение составляет 25 кВ и прерываемый ток не превышает 50 А [13]. Приборы с управлением внешним магнитным полем потребляют большую мощность в цепи управления (до 50% от переключаемой) и имеют длительное время восстановления. Наиболее перспективными для промышленного производства являются приборы, использующие сверхплотный тлеющий разряд и управляемые электрическими сигналами. Одна из разновидностей такого прибора – модуляторный переключатель «кроссатрон» (crossatron или CMS). Кроссатрон заполняется водородом или гелием при низком давлении. Источником заряженных частиц в нем является газовый разряд в скрещенных электрическом и магнитном полях, причем магнитное поле создается постоянными магнитами и локализовано вблизи катода. В настоящее время фирма Hughes Research Laboratory (США) рекламирует четыре типа кроссатронов на напряжения 20, 40 и 50 кВ и прерываемый ток до 1 кА при среднем токе до 3 А [14].

ГРПУ, созданный в НИИ газоразрядных приборов и используемый в наших исследованиях, позволял получать импульсы перенапряжения до 100 кВ. Отличием ГРПУ от кроссатрона [15] является большая экранировка высоковольтной анодно-сеточной камеры от продуктов распыления материала катода. При этом не утрачены основные преимущества кроссатронов – низкое падение напряжения в разряде и хорошая управляемость.

Управление таситроном, кроссатроном и ГРПУ обеспечивается использованием мелкоструктурной, с размером отверстия порядка 0,3 мм, сеткой. Выключение электронного тока на анод происходит следующим образом. В фазе проводимости (после включения прибора и при протекании через него тока) между катодом и анодом образуется плазма. Если напряжение на сетке, находящейся между катодом и анодом, сделать ниже потенциала плазмы, то на сетку потечет ионный ток и между плазмой и сеткой возникнет локальная разность потенциалов. На этом участке возникает дополнительная ионизация, воспроизводящая потери ионов на сетке. По данным зондовых измерений [16], средняя температура электронов в этой области составляет 42000–45000 К, т.е. имеется значительное число электронов с энергией больше потенциала ионизации. При увеличении разрядного тока (десятки ампер и более) и, соответственно, увеличении концентрации плазмы потенциал сетки может и без подачи дополнительного отрицательного напряжения стать значительно ниже (на десятки вольт) потенциала плазмы. В [16] потенциал сетки отличался от потенциала плазмы на 26–30 В. Из-за этого у сетки возникают плотные ионные оболочки. Размер оболочки ( $\Delta X$ ) определяется плотностью тока ( $J_i$ ), массой иона ( $M_i$ ) и разностью потенциалов ( $V$ ) между управляющей сеткой и плазмой. Зависимость между этими величинами определена в теории оболочки Чайлда–Ленгмюра и выражается уравнением

$$J_i = 4/9\epsilon_0(2e/M_i)^{1/2} V^{3/2}/(\Delta X)^2, \quad (1)$$

где  $\epsilon_0$  – диэлектрическая постоянная вакуума;  $e$  – заряд электрона.

При рабочих давлениях, характерных для тиратронов (0,2 – 0,6 Торр), размер оболочки мал относительно размеров отверстий в сетке. Это приводит к экранировке поля управляющего электрода и утрате возможности управления по сетке. В таситроне, кроссатроне и ГРПУ за счет меньшего давления рабочего газа (0,05 – 0,1 Торр) размер ионной оболочки увеличен, поэтому при подаче импульса отрицательной полярности на сетку с малыми размерами ячейки

(0,32 мм)  $\Delta X$  увеличивается, приводя к смыканию ионных оболочек на каждой ячейке сетки и запирацию электронного тока на анод. Оставшийся ионный заряд в анодно-сеточном пространстве устремляется на сетку, т.е. анодный ток замкнется на сетку и в отсутствие ионизации наполняющего газа будет уменьшаться до нуля.

### 3. Экспериментальная аппаратура и методики

Во время проведения данного эксперимента было испытано несколько ГРПУ в НИИ газоразрядных приборов (г. Рязань) и в Институте сильноточной электроники СО РАН (г. Томск). Все ГРПУ были созданы в НИИ ГРП, г. Рязань. Эксперименты проводились со схемой управления как при использовании собственного гасящего устройства – дополнительного тиратрона, встроенного в ГРПУ, так и с внешним тиратроном, который формировал сигнал гашения.

На рис. 1 приведена электрическая схема включения ГРПУ с собственным гасящим устройством. Импульсное магнитное поле с максимальной напряженностью 30 мТл создавалось катушкой индуктивности  $L_M$  при срабатывании тиристора Т2-12. В ряде экспериментов применялось постоянное магнитное поле, которое создавалось самарий-кобальтовыми постоянными магнитами, расположенными вдоль боковой поверхности катодной части кроссатрона. Синхронизация включения с регулируемыми задержками тиристора Т2-12 и тиратронов управления  $T_1 - T_3$  осуществлялась генератором ГИ-1. Напряжение питания магнитов катушки индуктивности  $U_M$  не превышало 350 В, напряжение на конденсаторах каналов управления и подготовительного разряда  $U_1 \sim 1,7$  кВ, напряжение гашения  $U_{\text{гаш}}$  варьировалось в пределах 0–4 кВ. Индуктивность контура разрядки ГРПУ без дополнительной сосредоточенной индуктивности  $L_0$  не превышала 0,4 мкГн.

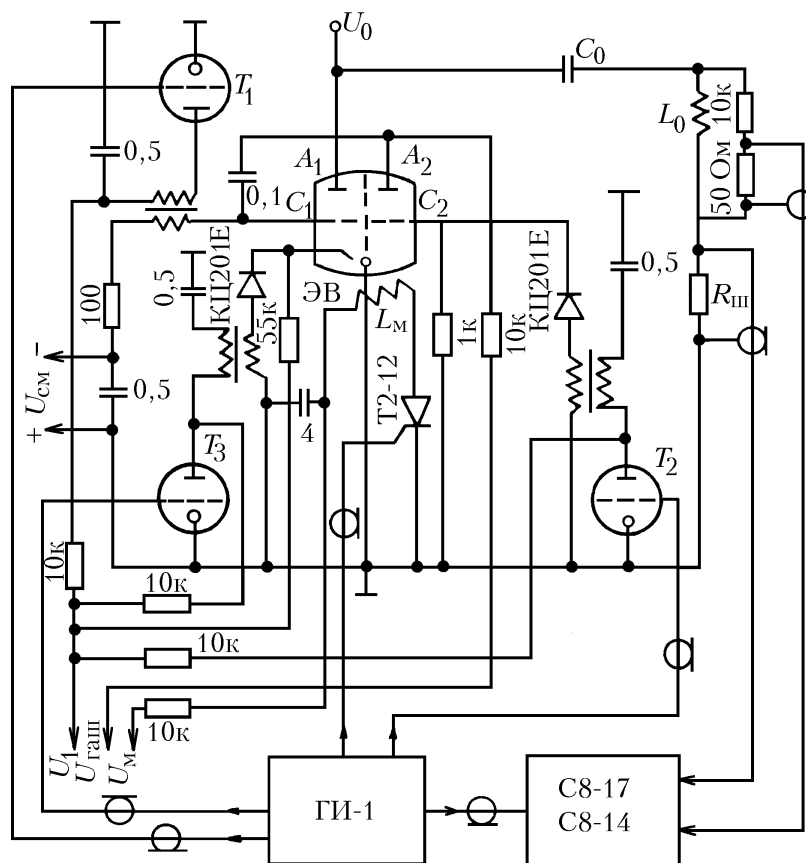


Рис. 1. Электрическая схема установки с использованием гасящего устройства, встроенного в ГРПУ.  $T_1$ ,  $T_2$  и  $T_3$  – тиратроны;  $U_{\text{см}}$  – напряжение смещения;  $C_0$  – накопительный конденсатор;  $L_0$  – индуктивность разрядного контура; ЭВ – электрод вспомогательный

В схеме с включением внешнего гасящего устройства был использован тиратрон ТГИ1-60/5. На рис. 2 приведена электрическая схема включения тиратрона гашения. Величина  $U_{\text{гаш}}$  варьировалась в диапазоне 0–4 кВ. Для уменьшения времени формирования сигнала гашения и улучшения коммутационных свойств тиратрона ТГИ1-60/5 цепь разрядки данного тиратрона была выполнена с минимальной индуктивностью, а также подобраны напряжения питания накала катода и генератора водорода. Это позволило получить длительность переднего фронта импульса тока в канале гашения не более 20 нс.

Для регистрации импульсов тока и напряжения применялись токовые шунты и делители напряжений, изготовленные из малоиндуктивных сопротивлений ТВО, сигналы с которых подавались на осциллографы С8-14 или С8-17.

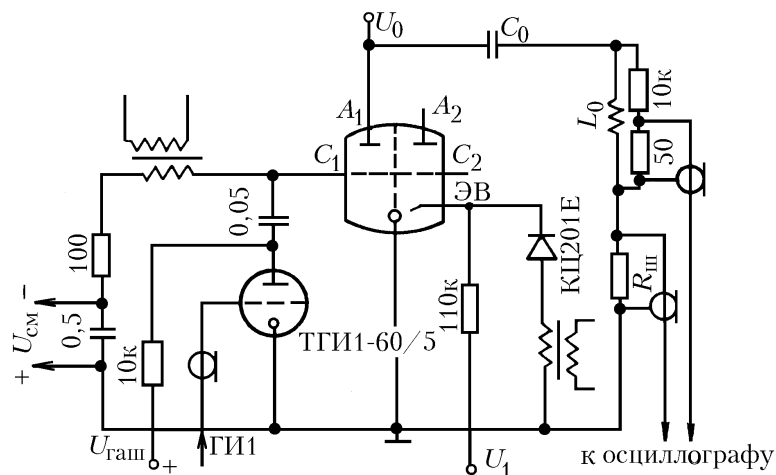


Рис. 2. Электрическая схема установки при использовании внешнего тиратрона гашения

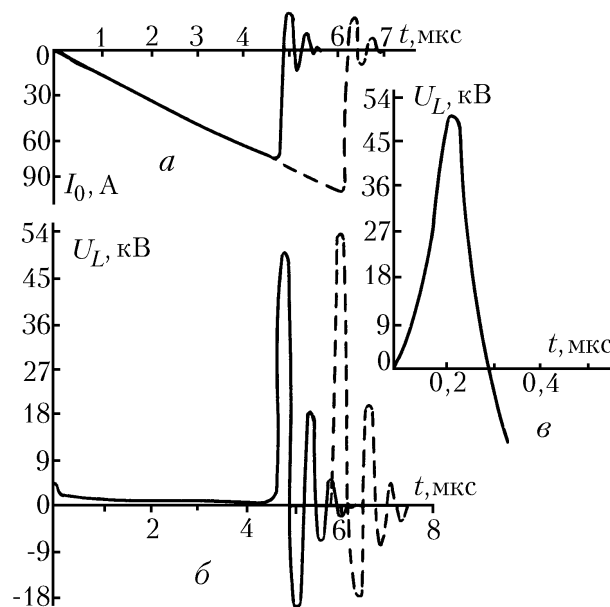


Рис. 3. Осциллограммы токов через анод N 1 и напряжений на индуктивности  $U_L$  при использовании внешнего тиратрона гашения.  $U_0 = 3,8$  кВ,  $f = 200$  Гц, средний ток  $I_{\text{сред}} = 0,1$  А

#### 4. Характеристики генераторов с индуктивным накопителем энергии

Устойчивая работа генераторов была реализована и с использованием собственного гасящего устройства, и при включении внешнего тиратрона, формирующего сигнал гашения. Диапазон анодных напряжений источника питания, когда наблюдались устойчивые обрывы тока, составлял 2–12 кВ, максимальный обрываемый (выключаемый) ток – 0,5 кА. Наиболь-

шие скорости обрыва тока  $di/dt \sim 10^9$  А/с были получены при включении внешнего тиристора гашения. Время выключения достигало 110 нс. При обрываемых токах 150 – 200 А генератор устойчиво работал в импульсно-периодическом режиме с частотой повторения до 2 кГц. Наибольшее выходное напряжение составило 100 кВ при величине индуктивности  $L_0 \sim 100$  мкГн. На рис. 3 приведены осциллограммы полного тока  $I_0$  через ГРПУ (а), напряжения на индуктивности  $U_L$ , зарегистрированные на длинной (б) и короткой (в) развертках осциллографа, полученные при различных задержках импульса гашения, подаваемого от внешнего тиристора. Отметим, что максимальные скорости обрыва тока через ГРПУ реализовались при подаче импульса гашения до достижения максимального тока, т.е. на переднем фронте импульса тока.

### 5. Моделирование работы генератора с индуктивным накопителем энергии

Для моделирования режимов работы генератора с индуктивным накопителем энергии была составлена программа для расчета простейшего разрядного контура, показанного на рис. 4. Величины  $L_0$ ,  $C_0$  могли варьироваться в широких пределах, сопротивление ГРПУ до начала обрыва тока с учетом результатов работы [17] принималось равным 0,5 Ом. Временной ход величин сопротивления ГРПУ  $R_{пт}$  и нагрузки  $R_n$  задавался следующим образом:

$$R_{пт} = \begin{cases} 0,5 \text{ Ом}; & 0 \leq t < t_1, \\ dR/dt(t - t_1) + 0,5; & t \geq t_1, \end{cases} \quad (2)$$

где  $t_1$  – время начала обрыва тока в контуре;  $dR/dt \sim 5 \cdot 10^8$  Ом/с;

$$R_n = \begin{cases} 10^6; & 0 \leq t < t_2, \\ 20 + 10^6/\exp[\alpha(t - t_2)]; & t \geq t_2, \end{cases} \quad (3)$$

где  $t_2$  – время пробоя газоразрядной нагрузки при достижении на ней напряжения пробоя;  $\alpha \approx 2,3 \cdot 10^8$  с<sup>-1</sup>.

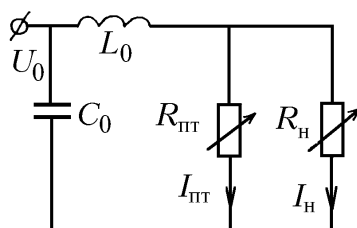


Рис. 4. Упрощенная схема генератора с индуктивным накопителем энергии.  $C_0$  – накопительный конденсатор;  $L_0$  – индуктивность;  $R_{пт}$  – сопротивление прерывателя тока;  $R_n$  – сопротивление нагрузки;  $I_{пт}$  – ток через прерыватель;  $I_n$  – ток через нагрузку

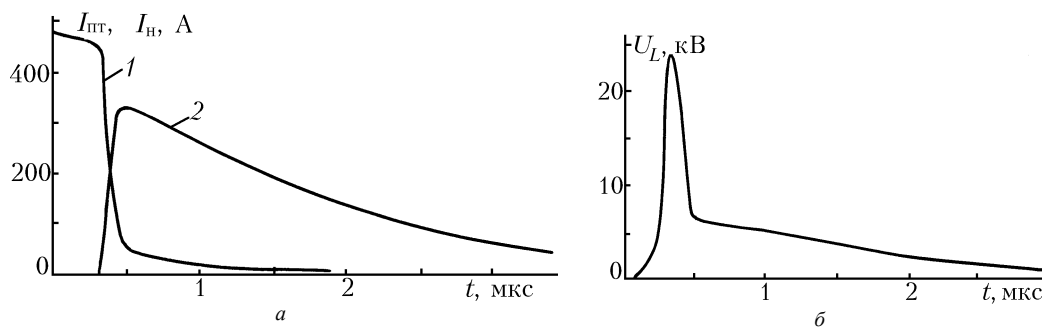


Рис. 5. Расчетные осциллограммы тока через прерыватель  $I_{пт}$  (1), тока через нагрузку  $I_n$  (2) и напряжения на нагрузке  $U_L$

Величины  $\alpha$  и  $dR/dt$  подбирались при сравнении расчетных и экспериментальных данных при работе генератора в режиме холостого хода, а также при работе с нагрузкой. На рис. 5 приведены расчетные осциллограммы тока через ГРПУ  $I_{пт}$ , тока через нагрузку  $I_n$  и напряжения на нагрузке  $U_L$ . При зарядном напряжении 2 кВ,  $C_0 = 2$  мкФ,  $L_0 = 30$  мкГн величина тока,

переключаемого в нагрузку, составила  $\sim 70\%$ , а напряжение на нагрузке  $\sim 28$  кВ. Отметим, что в результате предварительных расчетов была выявлена зависимость доли омических потерь в ГРПУ при обрыве тока от величины сопротивления нагрузки. Для уменьшения потерь мощности в ГРПУ желательны быстрый спад и рост проводимости соответственно в ГРПУ и нагрузке.

## 6. Азотный лазер с накачкой от индуктивного накопителя энергии

Один из созданных генераторов с индуктивным накоплением энергии был использован для накачки азотного лазера с продольным разрядом. Длина и внутренний диаметр разрядной трубки составили соответственно 100 и 6,6 мм. Газоразрядная трубка подсоединялась параллельно ГРПУ. Резонатор был образован зеркалом с алюминиевым покрытием и плоскопараллельной кварцевой пластинкой. Амплитудно-временные характеристики излучения измерялись с помощью фотодиода ФЭК-22СПУ, а средняя мощность излучения калориметром ИМО-2Н. Измерения проводились как в режиме однократных импульсов, так и в импульсно-периодическом режиме с частотой повторения до 10 Гц. В этих экспериментах величины емкости  $C_0$  и индуктивности  $L_0$  составляли соответственно 2 мкФ и 32 мкГн, а зарядное напряжение  $U_0 = 2$  кВ.

На рис. 6 приведены осциллограммы импульсов напряжения на индуктивности  $U_L$ , которая соответствует осциллограмме импульса напряжения на лазерной камере, и импульса генерации  $P_G$  на  $\lambda = 337$  нм. Лазерное излучение наблюдалось на переднем фронте импульса тока и имело длительность импульса на полувысоте  $\sim 7$  нс, что типично для лазера на  $2^+$ -й системе азота (система полос  $C^3\Pi_u - B^3\Pi_g$ ).

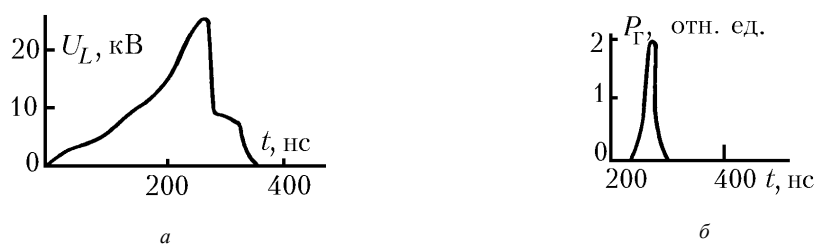


Рис. 6. Осциллограммы импульсов напряжения на индуктивности  $L_0$  и лазерного излучения на  $\lambda = 337$  нм азота

Эффективность генерации относительно энергии, вложенной в газ во время импульса излучения, составила 0,2%. Это достаточно высокая эффективность для азотного лазера с накачкой продольным разрядом. Для получения высокой полной эффективности газовых лазеров при накачке от генераторов с индуктивным накопителем энергии необходимо согласование длительности и формы импульса накачки и импульса генерации [9]. Зависимость энергии излучения в импульсе от давления азота при работе лазера в импульсно-периодическом режиме имела оптимум при  $P = 30$  Торр, а зарядное напряжение накопительного конденсатора  $C_0$  было при этом всего 2 кВ.

## 7. Заключение

Таким образом, в настоящей статье приведены результаты экспериментальных исследований индуктивных накопителей энергии, использующих газоразрядные приборы с полным управлением ГРПУ. Получены импульсные напряжения до 100 кВ и частоты повторения до 2 кГц, осуществлено полное управление при токах до 500 А. Продемонстрирована накачка азотного лазера от индуктивного накопителя энергии с КПД  $\sim 0,2\%$  от энергии, вложенной во время импульса излучения.

Возможности применения генераторов с индуктивным накоплением энергии и коммутатором – ГРПУ – весьма разнообразны, например, в мощных озонаторах, электрофильтрах на основе импульсной нано- и микросекундной стримерной короны, лазерных системах, в установках по очистке воды с помощью импульсных разрядов и т.п. Кроме того, газоразрядные приборы с полным управлением тока могут использоваться как модуляторы с полным и частичным разрядом емкости, как защитно-зарядные блоки различных радиоэлектронных устройств и т.д. Отметим также, что ГРПУ может быть успешно использован как прибор с холодным катодом в режимах с полным разрядом емкостного накопителя через него. При испытаниях ГРПУ в таком

режиме при зарядном напряжении 25 кВ, максимальном токе 5 кА, частоте повторения 100 Гц и длительности импульса 1 мкс была достигнута долговечность прибора свыше 1000 ч.

1. Quenther A., Kristiansen M. and Martin T. // Opening Switches. New York and London: Plenum Press, V. 1.
2. Кремнев В.В., Месяц Г.А. Методы умножения и трансформации импульсов в силовой электронике. Новосибирск: Наука, 1987. 226 с.
3. Котов Ю.А., Месяц Г.А., Рукин С.Н., Филатов А.Л. // Доклады Академии наук. 1993. Т. 333. № 3. С. 315.
4. Патент Германии N 674.321, кл. 21 g, 12/03, 1937/M.J. Dryvesteyn.
5. Dryvesteyn M.J. // Physica. 1937. V. 4. № 8. P. 669.
6. Johnson E.O., Olmsted G., Malter W.M. Proc. IRE. 1954, Sept. P. 1350.
7. Espe W., Nix A. // Feinwerktechnik. 1966. V. 70. Hrg. P. Heft 5.
8. Патент Чехословакии N 90968.21d. 12/01. 15/VII 1959/ A. Nix.
9. Панченко А.Н., Тарасенко В.Ф. // Квантовая электроника. 1990. Т. 17. № 1. С. 32.
10. Harvey R.J., Lutz M.A. // IEEE Trans. on Plasma Sci. 1976. V. PS-4. P. 210.
11. А.с. СССР N 1593497. Кл. НОI, 17/30. 1989/Арш А.М., В.Д. Бочков, В.П. Пядин и др.
12. Баранов А.И., Бочков В.Д. // ПТЭ. 1991. № 5. С. 209.
13. Дворников В.Д., Латушкин С.Т., Тихомиров Л.М. и др. // ПТЭ. 1972. № 4. С. 108.
14. Laser Focus World. 1993. V. 29. № 4. P. 75.
15. А.с. СССР N 1732391 АI. Кл. НОIj, 17/38. 1992/ А.И. Баранов, А.М. Арш, В.П. Пядин и др.
16. Зайцев И.А., Кожевников И.Г., Николаев А.А., Шумаков С.П. // Электронная техника. 1969. Сер. 3(15). С. 33.
17. Баранов А.И., Гурков К.В., Ломаев М.И., Патрушев Д.П., Тарасенко В.Ф. // ПТЭ. 1994. № 4. С. 108.

НИИ газоразрядных приборов, г.Рязань  
Институт силовой электроники СО РАН, Томск

Поступила в редакцию  
1 августа 1995 г.

V.D. Bochkov, N.M. Vereshchagin, F.G. Goryunov, V.A. Krestov, M.I. Lomayev, V.B. Merkulov, V.F. Tarasenko, V.N. Shalygin. **Inductive Energy Storage Elements with Totally Controllable Gas Discharge Devices and Their Application.**

The schemes and test results for inductive energy storage elements with totally controllable gas discharge devices are presented. The following maximum parameters were obtained: pulse voltage up to 100 kV; pulse repetition rate up to 2 kHz. The totally controllable operation was demonstrated at current of values up to 500 A. The efficiency of the nitrogen laser pumped by inductive energy storage via laser pulse duration input energy was found to be 0,2%.