

## NUMERICAL MODEL OF A UNIT GAP OF LTD SWITCH

*Vitaly Michailovich Alexeenko <sup>a</sup>, Sergei Sergeevich Kondratiev,  
Vadim Anatolievich Sinebryukhov, Sergei Nikolaevich Volkov*

<sup>1</sup> Institute of High Current Electronics SB RAS, pr. Academichesky 2/3, Tomsk, 634055, Russia

<sup>a</sup> alexeenko@oit.hcei.tsc.ru

## ABSTRACT

The LTD generators are a promising area in the development of pulse power. One of the key features of LTD generators is the direct output of submicrosecond pulse, which requires the simultaneous triggering of a large number of switches. To simulate an LTD generator in order to study the possibility of optimizing the triggering system, a spark gap model is required that considers the dependence of the operation delay time on the parameters of the trigger pulse. For this purpose, a model of the LTD switch was developed, in which the moment of breakdown of each gap is calculated individually using an integral criterion. The performance of the model is confirmed by one value of air pressure in the switch and one value of triggering voltage rise rate. The rise rate of triggering pulse at the trigger electrode of the LTD switch depends on the triggering circuit of the LTD generator. To model various trigger systems, it is necessary to confirm the possibility of applying the integral criterion at a different rise rate of the trigger pulse. In addition, various pressures in the switches in different LTD generators are possible. In this paper, we confirm the possibility of using an integral criterion to determine the breakdown time of the gap of LTD switch for voltage rise rates from 1.5 to 3.5 kV/ns and air changes in the switches from 3.5 to 4.0 atm. In this case, the dependence of the value of the integral criterion on the rate of increase in voltage and air pressure can be neglected.

## KEYWORDS

Numerical model; gas switch; integral criterion.

## ЧИСЛЕННАЯ МОДЕЛЬ ЕДИНИЧНОГО ЗАЗОРА ЛТД РАЗРЯДНИКА

*Виталий Михайлович Алексеенко <sup>a</sup>, Сергей Сергеевич Кондратьев,  
Вадим Анатольевич Синебрюхов, Сергей Николаевич Волков*

Институт сильноточной электроники СО РАН, Россия, 634055, Томск, пр. Академический, 2/3

<sup>a</sup> alexeenko@oit.hcei.tsc.ru

## АННОТАЦИЯ

ЛТД генератор является перспективным направлением развития мощной импульсной техники. Одной из ключевых особенностей ЛТД генератора является прямое получение субмикросекундных импульсов, для чего необходимо обеспечить одновременное срабатывание большого количества разрядников. Для моделирования ЛТД генератора с целью изучения возможности

оптимизации системы запуска необходима модель разрядника, учитывающая зависимость времени задержки срабатывания от параметров пускового импульса. Для этого разработана численная модель ЛТД разрядника, в которой момент пробоя каждого зазора определяется индивидуально с помощью интегрального критерия. Работоспособность модели подтверждена для одного давления воздуха в разряднике и одной скорости нарастания пускового импульса. Скорость нарастания пускового импульса на пусковом электроде ЛТД разрядника зависит от конфигурации системы запуска ЛТД ступени. Для моделирования различных систем запуска необходимо подтвердить возможность применения интегрального критерия при различной скорости нарастания пускового импульса. Кроме того, рабочее давление в разрядниках в разных ЛТД генераторах может отличаться. В данной работе показана возможность применения интегрального критерия для определения времени пробоя зазора ЛТД разрядника для диапазона скоростей нарастания напряжения от 1,5 до 3,5 кВ/нс и давления воздуха в разрядниках от 3,5 до 4,0 ата. При этом можно пренебречь зависимостью величины интегрального критерия от скорости нарастания напряжения и давления воздуха.

## КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

Численная модель; газовый разрядник; интегральный критерий.

### Введение

ЛТД ступень – это базовый элемент ЛТД генератора, который является перспективным направлением развития импульсной техники [1–5]. Одним из главных достоинств ЛТД ступеней является субмикросекундная длительность выходного импульса, достигаемая без использования дополнительных схем укорочения и/или обострения импульса [1]. Это достигается особой структурой емкостного накопителя ЛТД ступени, который состоит из большого числа параллельно включенных секций. Каждая секция состоит из двух накопительных конденсаторов и газового разрядника. Для достижения заданных характеристик выходного импульса все разрядники накопителя должны срабатывать одновременно. До недавнего времени в ЛТД ступенях использовалась система запуска, разработанная на начальном этапе разработки ЛТД генераторов на основе экспериментальных исследований [1, 6]. В настоящее время появилось много работ, посвященных способам модернизации системы запуска ЛТД ступени [3, 7–9]. Однако в данных работах в основном описываются экспериментальные исследования. Для получения возможности моделирования срабатывания

ЛТД ступени необходимо иметь модель разрядника, учитывающую зависимость времени задержки срабатывания от формы пускового импульса.

В ИСЭ СО РАН для ЛТД ступени с масляным заполнением используется ЛТД разрядник, конструкция которого описана в [10]. Данный разрядник имеет шесть идентичных зазоров длиной 6 мм каждый и рассчитан на двуполярное напряжение  $\pm 100$  кВ. При полном зарядном напряжении на один зазор приходится  $\sim 33$  кВ. Распределение потенциала по зазорам производится с помощью отрицательного коронного разряда, иглы для которого установлены по оси всех электродов и одной из крышек. Ток коронного разряда при полном зарядном напряжении составляет 15–20 мкА. ЛТД разрядник позволяет обеспечить работу ЛТД ступени при зарядном напряжении до  $\pm 100$  кВ при давлении сухого воздуха в нем от 3,5 до 4 ата. Запуск разрядника производится подачей пускового импульса на средний электрод разрядника.

Данный разрядник достаточно подробно изучен, и имеется численная модель, учитывающая как коммутационные характеристики сработавшего разрядника, так и статистический разброс задержки времени срабатывания (джиттер) [11, 12]. Для добав-

ления возможности учета влияния формы пускового импульса на время задержки срабатывания была разработана более подробная модель, в которой учитывается каждый из шести зазоров [13–16]. Для определения момента пробоя зазора используется интегральный критерий пробоя [17]:

$$\int_0^{t_{break}} f dt = \lambda, \quad (1)$$

где  $t_{break}$  – время пробоя зазора;  $f=0$  при  $|U| \leq U_{break}$  и  $f=(|U| - U_{break})$  при  $|U| > U_{break}$ ;  $U$  – мгновенное значение напряжения;  $U_{break}$  – напряжение статического пробоя.

Как указано в [17], интегральный критерий имеет ограниченную применимость и был определен для зазора с однородным полем и подсвеченного ультрафиолетом, длиной зазора от 5 до 20 мм и заполненного азотом при давлении от 1 до 4 ата. Как видно, зазор ЛТД разрядника удовлетворяет указанным требованиям, однако находится на границе пределов. Использование интегрального критерия в модели ЛТД разрядника показало удовлетворительное совпадение результатов численного моделирования секции ЛТД ступени для давления воздуха в разряднике 4,0 ата и для определенной конфигурации системы запуска [13]. Однако для исследования возможности модернизации системы запуска ЛТД ступени необходи-

мо подтвердить возможность использования интегрального критерия для интересующих нас диапазонов давления воздуха и скоростей нарастания напряжения на зазоре.

В этой работе исследована возможность применения интегрального критерия для моделирования единичного зазора ЛТД разрядника на основе анализа экспериментальных данных, полученных при исследовании параметров пробоя единичного зазора ЛТД разрядника при давлении от 3,5 до 4 ата и скоростях нарастания напряжения от 1,5 до 3,25 кВ/нс.

### 1. Схема эксперимента

Схема эксперимента представлена на рис. 1. Поскольку в ЛТД генераторе номинальное зарядное напряжение составляет  $\pm 100$  кВ, то на один зазор разрядника приходится  $\sim 33$  кВ. Данное напряжение обеспечивает зарядный источник  $U_{charge}$ , подключенный к электроду зазора через токоограничивающее сопротивление  $R_1=390$  Ом. Второй электрод зазора через развязывающее сопротивление  $R_2=630$  Ом подключен к земле. Пусковой импульс с генератора  $U_{trig}$  подается на нижний электрод зазора через развязывающую индуктивность  $L_{trig}=3,5$  или  $12,9$  мкГн. Регистрация напряжения на зазоре производилась с помощью делителя ( $R_{div1}=4750$  Ом,  $R_{div2}=11,7$  Ом).

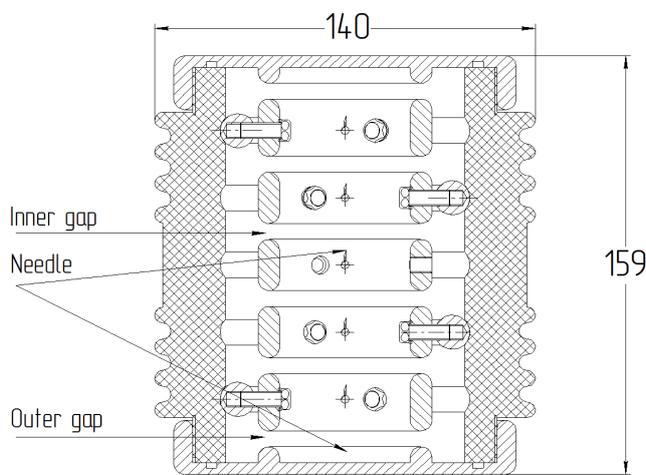
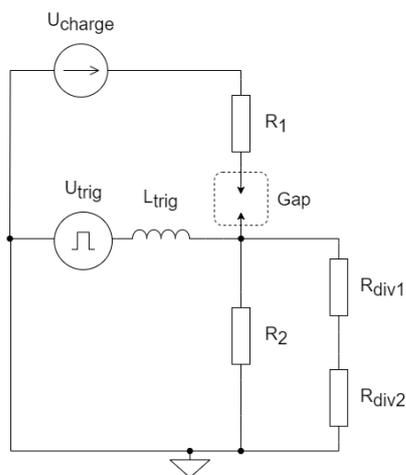


Рис. 1. Электрическая схема экспериментальной установки (слева) и конструкция ЛТД разрядника (справа)

Fig. 1. The electrical diagram of the experimental installation (left) and the design of LTD switch (right)

Исследовались три зазора: ближайший к пусковому электроду у двух разных разрядников и крайний у крышки со стороны «←» у одного разрядника. Ближайший к пусковому электроду зазор выбран, поскольку при срабатывании у него минимальное перенапряжение и пробой этого зазора в основном определяет задержку срабатывания половины разрядника. Крайний у крышки «←» зазор выбран по причине сниженного значения напряжения статического пробоя относительно всех остальных зазоров [10]. Все зазоры, кроме исследуемого, закорачивались специальными вставками. Диапазон давления выбран от 3,5 до 4,0 ата как используемый при работе ЛТД ступени на полное зарядное напряжение. Изменение скорости нарастания напряжения на зазоре обеспечивалось изменением величины развязывающей индуктивности и/или изменением величины зарядного напряжения пускового генератора, что должно обеспечить диапазон от 1,5 до 3,2 кВ/нс. Таким образом, определено 27 вариантов: три зазора, три значения давления воздуха и три формы пускового импульса. Для каж-

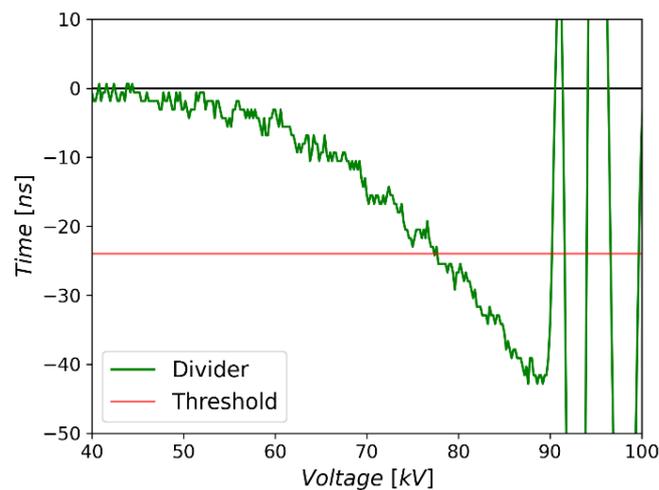
дого сочетания параметров производилось 600 последовательных срабатываний.

## 2. Анализ результатов

Типовая осциллограмма, регистрируемая делителем, приведена на рис. 2.

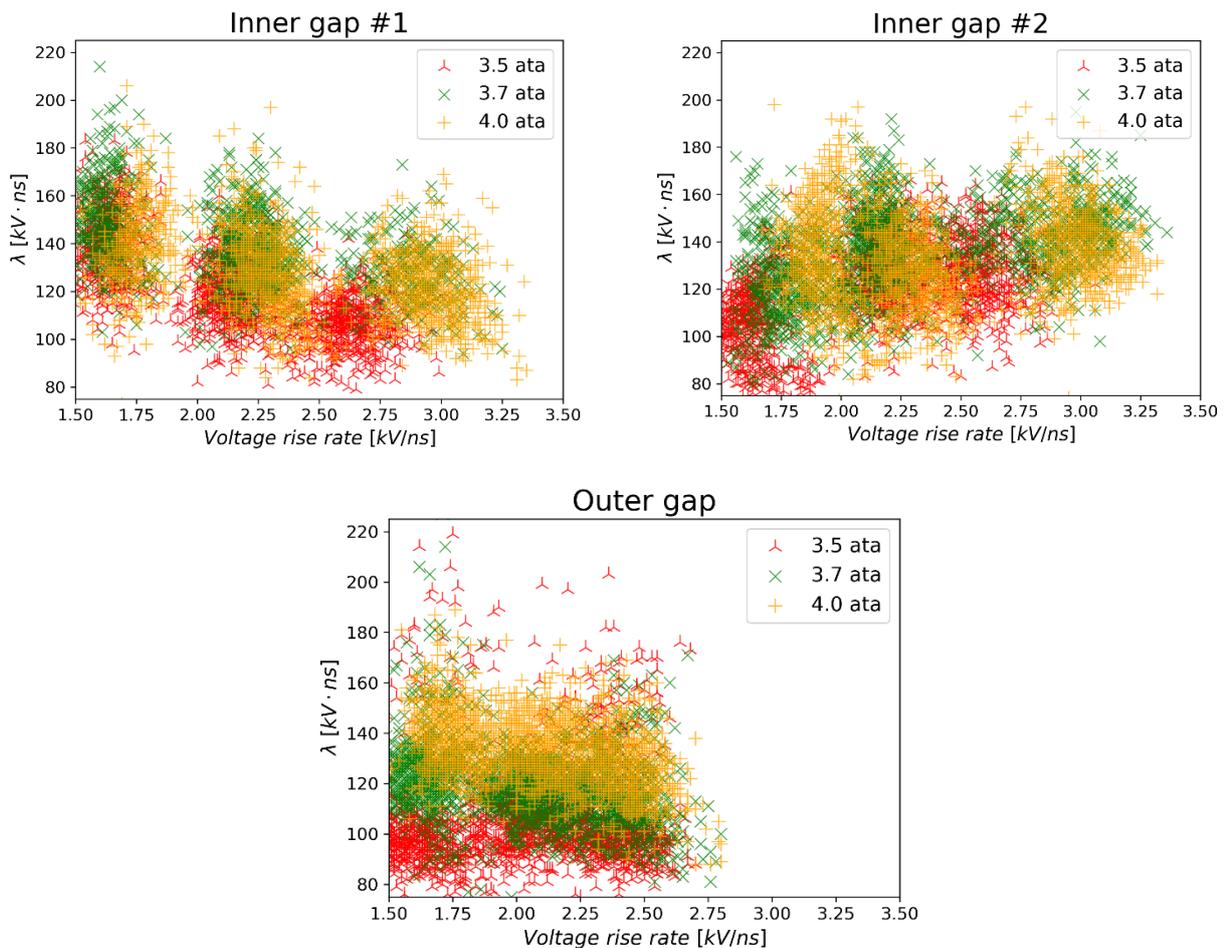
Делитель регистрировал напряжение на нижнем электроде зазора, задаваемого пусковым генератором ( $U_{trig}$  на рис. 1). Напряжение на зазоре больше на 33 кВ, которые обусловлены потенциалом верхнего электрода и задаются зарядным источником ( $U_{charge}$  на рис. 1).

На рис. 3 показаны результаты измерения вольт-секундного интеграла и скорости нарастания для каждой осциллограммы. Результаты сгруппированы по зазору и давлению воздуха. По скорости нарастания напряжения группировка не производилась, поскольку нестабильность формы выходного импульса пускового генератора привела к размыванию диапазона значений. Измерение скорости нарастания производилось на участке измерения вольт-секундного интеграла.



**Рис. 2.** Осциллограмма напряжения на нижнем электроде разрядника. Промежуточный зазор, давление воздуха 3,5 ата. Красным показано напряжение статического пробоя

**Fig. 2.** An oscillogram of the voltage at the lower electrode of the gap. Inner gap, air pressure 3.5 ata. The static breakdown voltage is shown in red.



**Рис. 3.** Экспериментальная величина интегрального критерия в зависимости от скорости нарастания напряжения

**Fig. 3.** Experimental value of the integral criterion depending on the voltage rise rate

Как видно из диаграмм, среднее значение интегрального критерия составляет  $\sim 120$  кВ·нс, что отличается от приведенного в [17] значения 400 кВ·нс. При этом разброс значений интегрального критерия составляет  $\sim 40\%$ , что соответствует данным, приведенным в [17]. Для оценки влияния скорости нарастания напряжения и давления воздуха рассчитано среднее значение и доверительный интервал для каждого значения скорости нарастания напряжения и давления воздуха. Результаты приведены на рис. 4.

Видно, что величина интегрального критерия для промежуточного зазора не имеет выраженной зависимости от давления, что подтверждается данными в табл. 1, тогда как для крайнего зазора величина интегрально-

го критерия имеет выраженную зависимость от давления. Это подтверждает ранее полученные результаты, что электрическое поле у крайних зазоров отличается от остальных. Визуально на рис. 4 видна небольшая зависимость величины интегрального критерия от скорости нарастания напряжения для всех электродов. Однако коэффициенты корреляции Пирсона [18], приведенные в табл. 2, показывают статистически незначимую зависимость для промежуточных зазоров и отсутствие зависимости для крайнего зазора. Таким образом, в общем случае можно пренебречь зависимостью величины интегрального критерия как от давления, так и скорости нарастания напряжения на интересующих нас диапазонах.

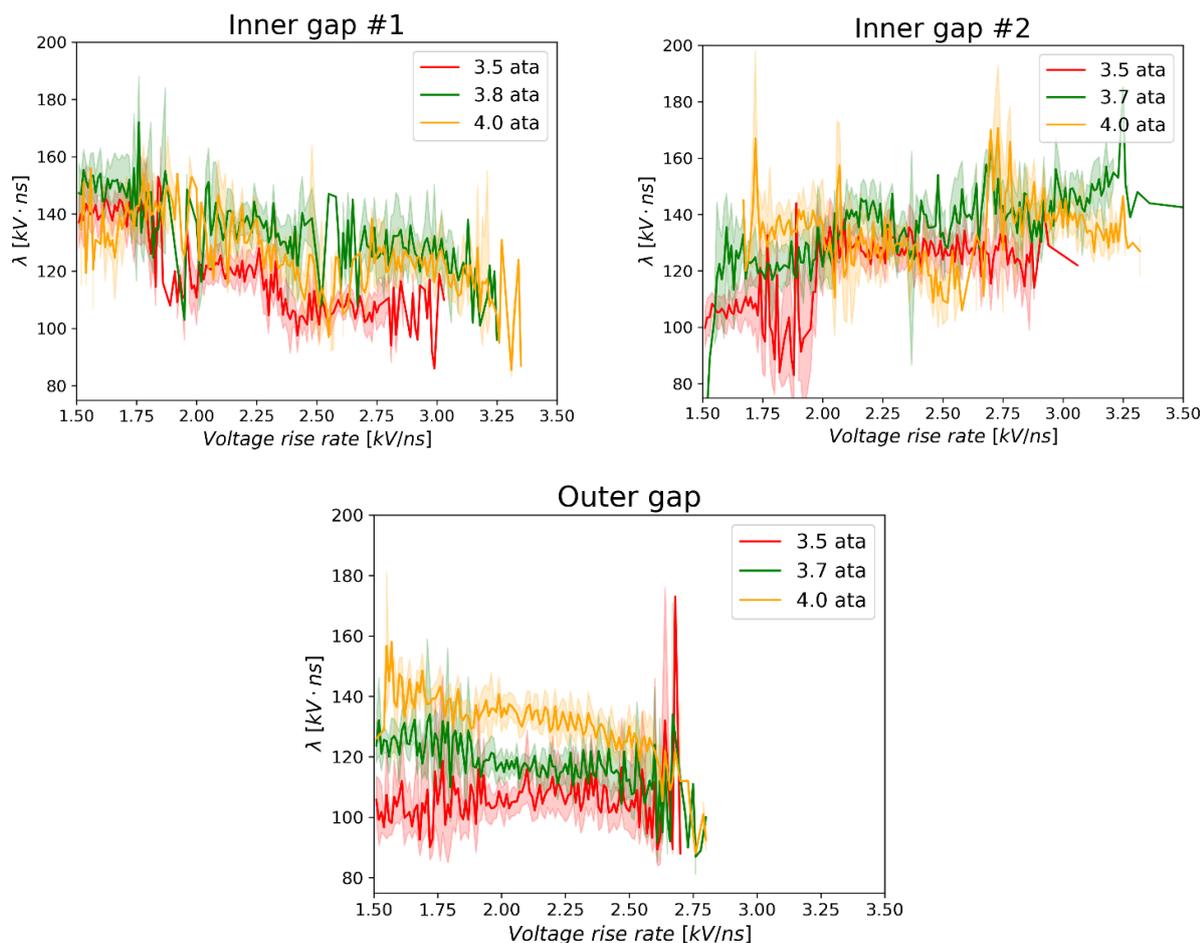


Рис. 4. Среднее значение интегрального критерия и доверительный интервал среднего значения, рассчитанные для каждого значения скорости нарастания напряжения

Fig. 4. The average value of the integral criterion and the confidence interval of the average value calculated for each value of the voltage rise rate

Таблица 1. Коэффициент корреляции Пирсона для зависимости величины интегрального критерия от скорости нарастания напряжения

Table 1. Pearson correlation coefficient for the dependence of the value of the integral criterion on the voltage rise rate

Gap	Inner gap #1		Inner gap #2			Outer gap			
Pressure, ata 3.5	3.8	4.0	3.5	3.8	4.0	3.5	3.8	4.0	
$\rho$	0.331	0.778	0.251	0.589	0.495	0.186	-0.045	-0.304	-0.413

Таблица 2. Среднее значение интегрального критерия при различном давлении

Table 2. The average value of the integral criterion at different pressures

Gap	Inner gap #1			Inner gap #2			Outer gap		
Pressure, ata	3.5	3.8	4.0	3.5	3.8	4.0	3.5	3.8	4.0
$\lambda_{mean}$ , kV·ns	116.3	116.9	124.8	119.3	134.1	133.4	107.6	118.8	133.0

## Результаты

В результате проведенной работы показана возможность применения в численной модели интегрального критерия для определения времени пробоя единичного зазора ЛТД разрядника, используемого в ЛТД генераторах. Уточненное значение интегрального критерия составляет 120 кВ·нс с разбросом  $\pm 40\%$  для зазора с однородным полем, длиной 6 мм и подсвеченного ультрафиолетом при давлении от 3,5 до 4,0 ата и скорости нарастания напряжения от 1,5 до 3,25 кВ/нс. Зависимостью величины интегрального критерия от давления и скорости нарастания напряжения можно пренебречь.

## Благодарности / Acknowledgments

*Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации по теме № FWRM-2021-0001.*

*The work was carried out within the framework of the state assignment of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation under theme No. FWRM-2021-0001.*

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Kim A. A., Mazarakis M. G. The Story of the LTD Development // IEEE Transactions on Plasma Science. 2020. V. 48, Iss. 4. P. 749–756. DOI: 10.1109/TPS.2019.2954210.
- McBride R. D., Stygar W. A., Cuneo M. E., Sinars D. B., Mazarakis M. G., Leckbee J. J., Savage M. E., Hutsel B. T., Douglass J. D., Kiefer M. L., Oliver B. V., Laity G. R., Gomez M. R., Yager-Elorriaga D. A., Patel S. G., Kovalchuk B. M., Kim A. A., Gourdain P.-A., Bland S. N., Portillo S., Bott-Suzuki S. C., Beg F. N., Maron Y., Spielman R. B., Rose D. V., Welch D. R., Zier J. C., Schummer J. W., Greenly J. B., Covington A. M., Steiner A. M., Campbell P. C., Miller S. M., Woolstrum J. M., Ramey N. B., Shah A. P., Sporer B. J., Jordan N. M., Lau Y. Y., Gilgenbach R. M. A Primer on Pulsed Power and Linear Transformer Drivers for High Energy Density Physics Applications // IEEE Transactions on Plasma Science. 2018. V. 46, Iss. 11. P. 3928–3967. DOI: 10.1109/TPS.2018.2870099.
- Conti F., Valenzuela J. C., Fadeev V., Aybar N., Reisman D. B., Williams A., Collins G., Narkis J., Ross M. P., Beg F. N., Spielman R. B. MA-class linear transformer driver for Z-pinch research // Physical Review Accelerators and Beams. 2020. V. 23, Iss. 9. Article number 090401. DOI: 10.1103/PhysRevAccelBeams.23.090401.
- Fan S., Wei H., Gong Z., Wu H., Yao W., Qiu A. Model of a 5-MA Linear-Transformer-Driver Accelerator: Transmission-Line-Circuit Method and Three-Dimensional Field-Circuit Coupling Method // IEEE Transactions on Plasma Science. 2022. V. 50, Iss. 12. P. 4912–4918. DOI: 10.1109/TPS.2022.3223518.
- Shapovalov R. V., Sporer B. A., Jordan N. M., McBride R. D. Progress on the 4-cavity BLUE LTD System at the University of Michigan // 2021 IEEE International Conference on Plasma Science (ICOPS), 2021. DOI: 10.1109/ICOPS36761.2021.9588432.
- Kim A. A., Mazarakis M. G., Sinebryukhov V. A., Kovalchuk B. M., Visir V. A., Volkov S. N., Bayol F., Bostrikov A. N., Durakov V. G., Frolov S. V., Alexeenko V. M., McDaniel D. H., Fowler W. E., LeChien K., Olson C., Stygar W. A., Struve K. W., Porter J., Gilgenbach R. M. Development and tests of fast 1-MA linear transformer driver stages // Physical Review Special Topics-Accelerators and Beams. 2009. V. 12, Iss. 5. Article number 050402. DOI: 10.1103/PhysRevSTAB.12.050402.
- Lin Z., Zhenghong L., Zhen W., Chuan L., Mingjia L., Jianmin Q., Yanyun Ch. Design of a 5-MA 100-ns linear-transformer-driver accelerator for wire array Z-pinch experiments // Physical Review Accelerators and Beams. 2016. V. 19, Iss. 3. Article number 030401. DOI: 10.1103/PhysRevAccelBeams.19.030401.
- Douglass J. D., Hutsel B. T., Leckbee J. J., Mulville T. D., Stoltzfus B. S., Wisher M. L., Savage M. E., Stygar W. A., Breden E. W., Calhoun J. D., Cuneo M. E., De Smet D. J., Focia R. J., Hohlfelder R. J., Jaramillo D. M., Johns O. M., Jones M. C., Lombrozo A. C., Lucero D. J., Moore J. K., Porter J. L., Radovich S. D., Romero S. A., Sceiford M. E., Sullivan M. A., Walker C. A., Woodworth J. R., Yazzie N. T., Abdalla M. D., Skipper M. C., Wagner C. 100 GW linear transformer driver cavity: Design, simulations, and performance // Physical Review Accelerators and Beams. 2018. V. 21, Iss. 12. Article number 120401. DOI: 10.1103/PhysRevAccelBeams.21.120401.
- Chen L., Zou W., Zhou L., Wang M., Liu Y., Liu L., Deng M., Liu D., Zhu J., Lian K., Wei B., Tian Q., Guo F., He A., Feng Sh., Xie W., Meng L., Deng J., Zhao Y., Zhang L., Li F., Jiang J., Wang J., Zhang Yu., Li Y., Dai Y., Han W., Li Y., Yao B., Ding Y., Kang J. Development of a fusion-oriented pulsed power module // Physical Review Accelerators and Beams. 2019. V. 22, Iss. 3. Article number 030401. DOI: 10.1103/PhysRevAccelBeams.22.030401.
- Kim A., Frolov S., Alexeenko V., Sinebryukhov V., Mazarakis M., Bayol F. Prefire probability of the switch

type Fast LTD // 2009 IEEE Pulsed Power Conference, 2009. P. 565–570. DOI: 10.1109/PPC.2009.5386341.

11. Kim A. A., Durakov V. G., Volkov S. N., Bastrov A. N., Kovalchuk B. M., Sinebryukhov V. A., Frolov S. V., Alexeenko V. M., Veron L., Toury M., Vermare C., Nicolas R., Bayol F., Drouilly C. Gas switch performance depending on current in the circuit // Proc. 14th Symp. High Current Electronics, 2006. P. 297–300.

12. Alexeenko V. M., Mazarakis M. G., Kim A. A., Kondratiev S. S., Sinebryukhov V. A., Volkov S. N., Cuneo M. E., Kiefer M. L., Leckby J. J., Oliver B. V., Maloney P. D. Factors affecting the output pulse flatness of the linear transformer driver cavity systems with 5th harmonics // Physical Review Accelerators and Beams. 2016. V. 19, Iss. 9. Article number 090401. DOI: 10.1103/PhysRevAccelBeams.19.090401.

13. Alexeenko V., Kondratiev S., Sinebryukhov V., Volkov S., Kim A. Peculiarities of using the charging coils in Fast LTD cavities // 20th International Symposium on High-Current Electronics (ISHCE), 2018. P. 113–116. DOI: 10.1109/ISHCE.2018.8521225.

14. Alexeenko V. M., Kondratiev S. S., Sinebryukhov V. A., Volkov S. N. Optimization of the numerical model of the triggerable LTD spark gap switch // Journal of Physics: Conference Series. 2019. V. 1393, No. 1. Article number 012068. DOI: 10.1088/1742-6596/1393/1/012068.

15. Alexeenko V. M., Kim A. A., Sinebryukhov V. A., Kondratiev S. S., Volkov S. N. Trigger circuit optimization of the oil-insulated LTD cavity // Proceedings of 8th International Congress on Energy Fluxes and Radiation Effects, 2022. P. 322–327. DOI: 10.56761/EFRE2022.S4-O-001004.

16. Zhou L., Ye M., Lu J., Meng Sh., Ye F., Jiang Sh., Yi Q., Yan X., Yang R., Li Zh. Modeling and Experimental Studies of a Multi-Gap Gas Switch for Linear Transformer Drivers // IEEE Transactions on Plasma Science. 2023. V. 51, Iss. 1. P. 193–198. DOI: 10.1109/TPS.2022.3227331.

17. Кремнев В. В., Месяц Г. А. Методы умножения и трансформации импульсов в сильноточной электронике. Новосибирск: Наука, 1987. 226 с.

18. Huber P. J. Robust statistics. John Wiley & Sons, 2004. V. 523. P. 317.