

Анализ эффективности комбинированных схем умножения мощности мегаджоульного диапазона для Z-пинч нагрузок

*В.А. Кокшениев**

Институт сильноточной электроники СО РАН, Томск, Россия

**vak@oit.hcei.tsc.ru*

Аннотация. В работе изложены результаты численного моделирования работы комбинированной схемы на основе каскадного включения мегаамперного генератора Маркса, удвоителя тока нагрузки с ферромагнитным сердечником и микросекундного плазменного прерывателя тока на газоплазменный лайнер. Проведенные тестовые эксперименты с каскадной схемой на генераторе ГИТ-12 позволили оптимизировать элементы конструкции для увеличения энергетических характеристик импульса в нагрузке. Предложена модернизация кросс-ввода и узла нагрузки, позволившая значительно уменьшить начальную индуктивность тракта подвода энергии к лайнеру. Численный анализ модернизированной каскадной схемы показал, что предложенная нами новая технология мощной импульсной техники позволяет проводить на генераторе ГИТ-12 эксперименты с газоплазменными лайнерами при амплитудах тока до 6 МА при сокращении времени импльзии до 3 раз.

Ключевые слова: трансформатор тока, плазменный ключ, газоплазменный лайнер.

1. Введение

В экспериментах с газоплазменными лайнерами излучательные характеристики пропорциональны, по крайней мере, квадрату амплитуды тока [1]. Создание новых установок мегаамперного диапазона связано со значительными материальными затратами. Поэтому повышение выходных характеристик имеющихся генераторов является важной задачей. Для увеличения амплитуды тока в нагрузке без значительной модернизации существующего генератора в работе [2] предложен умножитель тока нагрузки (LCM – Load Current Multiplier). Приведены оценки возможной эффективности таких схем с коэффициентом трансформации 2 и 3. Для мегаамперного и мегаджоульного диапазона практический интерес представляет схема удвоения тока нагрузки (УТН). В случае реализации схемы УТН в вакууме – имеем фактически дело с широкополосным трансформатором тока на двух отрезках вакуумных линий, включенных последовательно со стороны генератора и параллельно со стороны нагрузки. Проведено тестирование УТН на мегаамперных генераторах с фронтом тока 100 нс [3, 4] и микросекундном мегаджоульном генераторе ГИТ-12 [5, 6]. Для сильноточных низкоимпедансных генераторов критическим параметром является импеданс нагрузки и реализация величины развязывающей индуктивности L много большей индуктивности нагрузки для получения коэффициента трансформации ~ 2 . Так, на генераторе МИГ [4] ($\rho = 0.75$ Ом, 2.5 МА, 100 нс) при установке УТН с коэффициентом трансформации $\kappa = 1.75$ только при постоянной индуктивности нагрузки 5 нГн можно получить полуторакратное увеличение тока нагрузки по сравнению с режимом работы генератора МИГ без УТН. На мегаджоульном генераторе ГИТ-12 (4.7 МА, 1.7 мкс) увеличение развязывающей индуктивности при установке магнитного сердечника в объеме L позволило получить в статической индуктивной нагрузке 5 нГн амплитуду тока ~ 8 МА с фронтом 1.8 мкс при коэффициенте трансформации не менее 1.95. В лайнерной нагрузке реализован ток 5 МА с фронтом 1.3 мкс при коэффициенте трансформации не менее 1.9. По сравнению с режимом без трансформатора тока пиковая амплитуда в излучающей нагрузке увеличена в 1.5 раза [7].

Создание эффективных источников мягкого рентгеновского излучения при переходе от генераторов с фронтом тока ~ 100 нс к генераторам со временем нарастания тока порядка микросекунды является и в настоящее время актуальной задачей. Для ее решения был

предложен новый тип нагрузки – газовый лайнер с внешней плазменной оболочкой [8]. Создание плазменной оболочки на внешнем диаметре газового лайнера позволяет сформировать симметричный токовый слой в начале процесса сжатия и повысить стабильность имплозии с большого начального радиуса. Полученные экспериментальные данные позволяют сделать вывод о высокой эффективности данного типа нагрузки для генерации мягкого рентгеновского излучения в микросекундном режиме имплозии газоплазменных лайнеров [1]. Для одновременного увеличения амплитуды тока и сокращения времени имплозии газоплазменного лайнера нами была предложена комбинированная схема на основе каскадного включения генератора Маркса, удвоителя тока нагрузки с ферромагнитным сердечником (УТНФС) и микросекундного плазменного прерывателя тока (МППТ) [9]. Для варианта с МППТ до УТНФС при амплитуде тока генератора ГИТ-12 через плазменный размыкатель 4.2 МА с фронтом 1.5 мкс в индуктивную нагрузку 3.5 нГн переключен ток амплитудой 6 МА с фронтом 300 нс. В эквиваленте планарного лайнера получено 5.3 МА с фронтом 300 нс [10–13]. Результаты тестовых экспериментов позволили предложить решения для модернизации кросс-ввода и узла нагрузки с целью оптимизации и согласования элементов схемы при работе на Z- пинч нагрузку. Целью данной работы является анализ возможной эффективности модернизированной каскадной схемы при имплозии газовых лайнеров с внешней плазменной оболочкой.

2. Результаты численного моделирования

Численная модель, соответствующая электрическим и конструкционным параметрам исследуемой схемы (см. Рис. 1) на генераторе ГИТ-12 (12 модульный микросекундный генератор Маркса – МППТ – УТНФС на отрезках вакуумных линий – блок нелинейной нагрузки), описывала динамику движения плазменной оболочки переменной массы под действием электромагнитных сил (snow plow-модель). Эффективность вариантов схем оценивалась по двум параметрам: подведенной к лайнеру энергии (Ed) и кинетической энергии оболочки (Ek) в финальной стадии сжатия. Рассмотрены 2 варианта (Рис. 2) распределения вещества плазменного лайнера по радиусу, 1 – $\rho(r) = C(\text{const})$, 2 – $\rho(r) = \rho_0 \exp(-r/A)$, где C , ρ_0 , и A выбраны так, чтобы погонная масса лайнера составляла 550 мкг/см. С учетом результатов тестирования каскадной схемы на генераторе ГИТ-12 [9–12] разработаны новый узел нагрузки и новая конструкция многоканального магнитоизолированного перехода, установленного на выходе удвоителя тока нагрузки.

При проектировании модификации кросс-ввода на выходе трансформатора тока и подводящего тракта к Z-пинч нагрузке были учтены следующие условия:

1. Для микросекундного режима сжатия лайнера, когда в течение основного времени процесса напряжение на нагрузке и, соответственно, в подводящих линиях мало, скорость возможного движения плазмы можно считать не более 2 см/мкс и зазоры должны быть не менее 2 см.
2. В финальный момент сжатия лайнера при формировании пинча длительностью не более 100 нс возможны напряжения ~ 1 МВ с напряженностями участков до 100 кВ/см и скорости перемыкания зазора достигают 10 см/мкс. Поэтому в подводящем коаксиале и в радиальной линии с лайнером зазоры также должны быть не менее 2 см.
3. Для минимизации утечек электронов на анод участки вакуумных линий, транспортирующие энергию к нагрузке, должны иметь уменьшающийся импеданс в направлении потока мощности.

4. Выбор зазоров должен иметь разумный компромисс между требованиями минимально возможной индуктивности тракта подвода энергии для эффективной передачи тока в нагрузку (малые зазоры) и минимальных электронных потерь (большие зазоры).

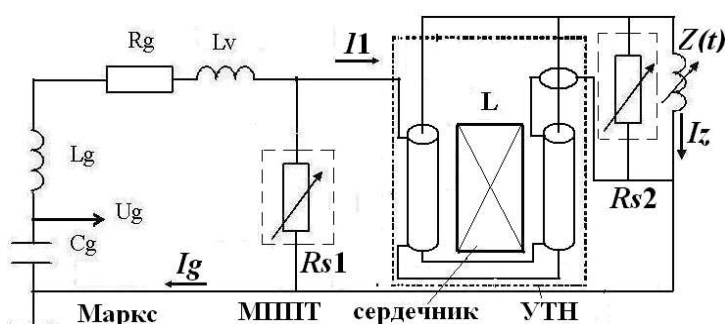


Рис. 1. Варианты комбинированных схем, апробированных в экспериментах на генераторе ГИТ-12. Вариант 1 – МПШТ (R_{s1}) установлен до УТН, вариант 2 – МПШТ (R_{s2}) установлен на выходе УТН.

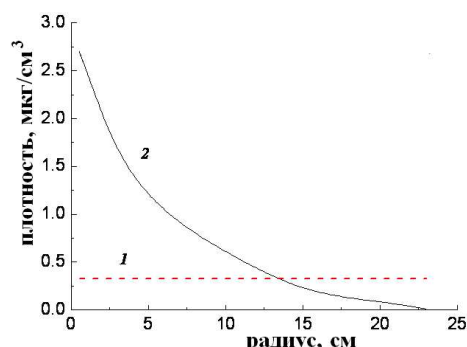


Рис. 2. Графики распределения плотности вещества лайнера по радиусу.
 1 – $\rho(r) = \text{const} = 0.325 \text{ мкг/см}^3$,
 2 – $\rho(r) = 3 \cdot \exp(-r/5.5) \text{ мкг/см}^3$.

На Рис. 3 дан возможный вариант конструкции узла нагрузки и многоканального перехода к нему с учётом вышеизложенных требований и предыдущего опыта работы с 12 канальным кросс-вводом типа штырь-отверстие. В подводящем к Z-пинчу коаксиальном тракте увеличен диаметр центрального электрода с 320 мм до 460 мм. Кросс-ввод выполнен в виде 24 отрезков полосковых линий, образованных 48 радиальными пластинами. Пластины попарно подключены к подводящему тракту таким образом, что обеспечивают параллельное включение вакуумных линий УТН к узлу нагрузки. Величина зазоров в кросс-вводе и подводящем коаксиале не менее 2 см. В результате модернизации значительно уменьшена начальная индуктивность узла нагрузки и кросс-ввода с 10 нГн до ~ 6 нГн. Представленные ниже расчеты выполнены для оптимизированного варианта каскадной схемы.

Для оценки эффективности работы генератора ГИТ-12 с УТНФС и без него сравним режимы имплозии газового лайнера с погонной массой 550 мкг/см для профиля плотности $\rho(r) = 3 \exp(-r/5.5) \text{ мкг/см}^3$ (график 2 на Рис. 2) с внешней плазменной оболочкой. На Рис. 4 (а) и (б) приведены графики тока генератора I_g и тока в нагрузке I_z для обоих режимов работы. Для варианта без УТНФС время имплозии 1280 нс при амплитуде тока 3.5 МА, подведенной к лайнеру энергии $E_d = 45.7 \text{ кДж/см}$ и кинетической энергии оболочки $E_k = 25 \text{ кДж/см}$. Для режима с УТНФС время имплозии 800 нс при амплитуде тока 5.5 МА, подведенной к лайнеру энергии $E_d = 91.8 \text{ кДж/см}$ и кинетической энергии оболочки $E_k = 65.6 \text{ кДж/см}$. Таким образом, установка УТНФС на генератор ГИТ-12 позволяет увеличить в ≥ 2 раз энергетические характеристики лайнера.

Для комбинированной схемы на основе 12 модульного генератора Маркса – плазменного прерывателя тока – УТНФС для лайнера с погонной массой 550 мкг/см проведены сравнительные расчеты обоих вариантов распределения вещества по радиусу: $\rho(r) = \text{const} = 0.325 \text{ мкг/см}^3$ и $\rho(r) = 3 \exp(-r/5.5) \text{ мкг/см}^3$ (см. Рис. 2). Для варианта с постоянной плотностью по радиусу при времени имплозии 800 нс энергетические характеристики на 15% выше, чем для варианта с нарастающей плотностью к оси системы. Два важных фактора не позволяют считать это преимущество определяющим для практического использования. Во первых, большее время имплозии 800 нс против 600 нс, во вторых, и это главное, для варианта $\rho(r) = 3 \exp(-r/5.5) \text{ мкг/см}^3$ реализуется практическая возможность стабильного сжатия, которая достигается благодаря использованию профиля

плотности, для которого градиент плавно нарастает от периферии к оси пинча сжимающегося лайнера (tailored density distribution [14]). Далее мы будем рассматривать только реализованный в экспериментах вариант с нарастающим градиентом плотности для стабильной имплюзии лайнера с внешней плазменной оболочкой [15, 16].

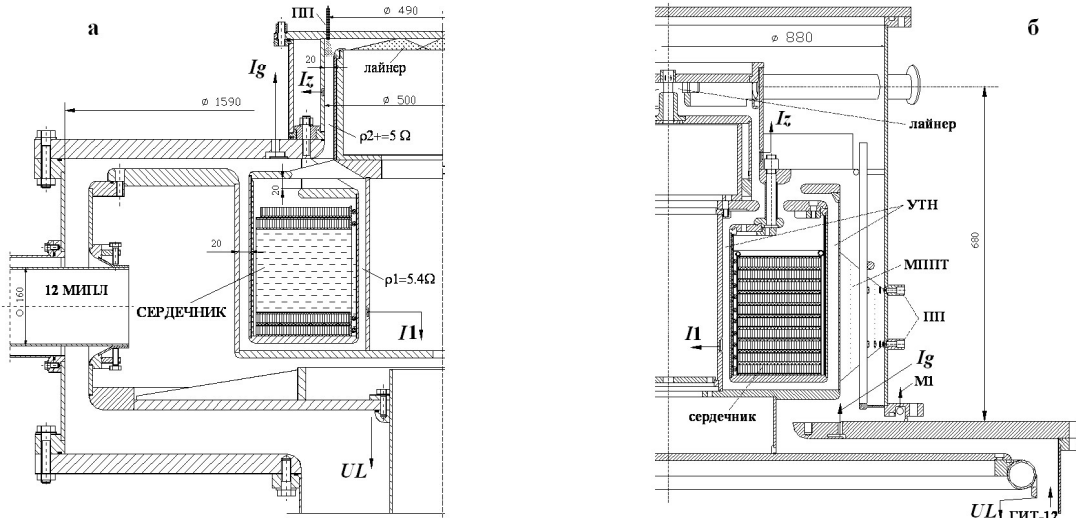


Рис. 3. а – конструкция встроенного в сборный электрод генератора ГИТ-12 трансформатора тока с модифицированным кросс-вводом и узлом нагрузки, б – тестовый вариант конструкции каскадной схемы на генераторе ГИТ-12 с кросс-вводом типа штырь-отверстие для эксперимента с планарным лайнером. U_L – датчик напряжения, I_g , I_1 , I_z – датчики токов генератора, на входе УТНФС и нагрузки соответственно.

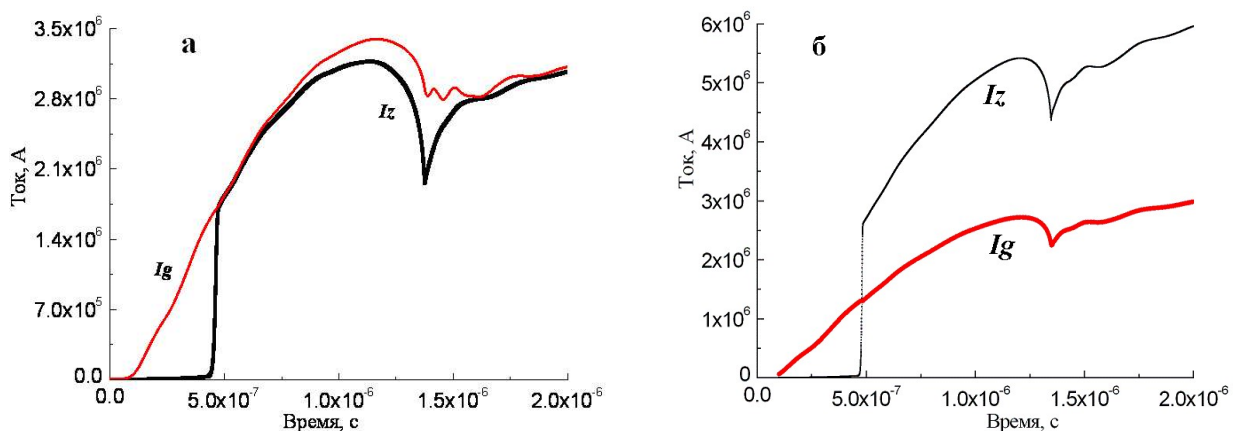


Рис. 4. Графики токов генератора I_g и нагрузки I_z при имплюзии лайнера с $\rho(r) = 3 \cdot \exp(-r/5.5)$ мкг/см³ для режимов работы: а – ГИТ-12 без УТНФС, б – ГИТ-12 с УТНФС.

На Рис. 5 даны графики тока генератора I_g , токов на входе I_1 и выходе I_2 УТНФС и тока I_z в нагрузке для обоих режимов компоновки каскадной схемы. В зависимости от размещения плазменного ключа по варианту 1 до УТНФС (R_{s1}) или на выходе УТНФС – вариант 2 (R_{s2}) (Рис. 1) при имплюзии лайнера с погонной массой 550 мкг/см токи в лайнере могут достигать 6.5 или 6.8 МА со временем имплюзии 600–570 нс соответственно. Пропорционально $\sim I_z^2$ изменяются и энергетические характеристики: 78 кДж/см против 88 кДж/см для кинетической энергии оболочки и 120 кДж/см против 133 кДж/см для введенной энергии. Уместно сравнить полученные результаты с режимом работы генератора ГИТ-12 только с плазменным прерывателем, в котором реализуется обострение фронта тока без удвоения его амплитуды. В этом режиме амплитуда тока в нагрузке достигает 4 МА с фронтом 150 нс, время имплюзии ~ 950 нс, $E_k = 25$ кДж/см, $E_d = 48.4$ кДж/см. Использование

каскадной схемы позволяет нам увеличить энергетические характеристики при имплозии лайнера более чем в 2 раза без увеличения энергозапаса генератора.

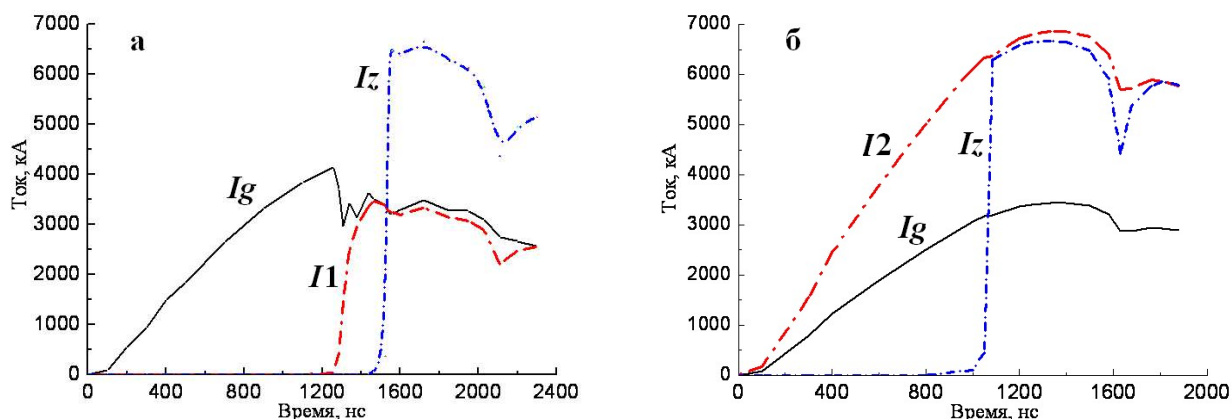


Рис. 5. Графики токов генератора (I_g), на входе (I_1) и выходе (I_2) УТНФС и в нагрузке (I_z) при имплозии лайнера с $\rho(r) = 3\exp(-r/5.5)$ мкг/см³ для режимов работы каскадной схемы: а – с плазменным ключом R_{s1} до УТНФС, б – с плазменным ключом R_{s2} за УТНФС.

Несмотря на более высокие характеристики по схеме R_{s2} реализация этого варианта требует увеличения сечения ферромагнитного сердечника на 30% для сохранения коэффициента трансформации УТНФС не менее 1.9 в течение всего процесса имплозии. Кроме того, существует проблема минимизации индуктивности узла нагрузки для устранения выносимой из МППТ плазмы в область Z-пинча. А это связано с удалением плазменного ключа от Z-пинча и ростом индуктивности нагрузки на выходе УТНФС, что приводит к падению тока в лайнере. Это следует из анализа эквивалентной схемы каскадной компоновки генератора, который подробно описан в работе [10]. В этой работе получены аналитические оценки коэффициентов умножения тока ($K_I \cong 1.5-1.7$) для обоих вариантов каскадной схемы с учетом характеристик ГИТ-12 и УТНФС для статической индуктивности нагрузки. Z-пинч – динамическая нагрузка и её влияние на работу каскадной схемы можно получить только из численных расчётов, что и представлено в данной работе.

3. Заключение

Таким образом, численные расчеты модернизированной каскадной схемы, включающей работу 12 модульного генератора Маркса – плазменного прерывателя тока – удвоителя тока нагрузки – Z-пинч нагрузки, показали, что данная технология позволяет существенно увеличить эффективность генератора с микросекундным фронтом мегаамперного тока без значительных материальных затрат. Использование каскадной схемы на мегаджоульном генераторе ГИТ-12 при работе с газовыми лайнерами с внешней плазменной оболочкой позволяет сократить до 3 раз время имплозии и увеличить более чем в 2 раза вложенную в лайнер энергию.

Благодарности

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

4. Список литературы

- [1] А.В. Шишлов, В.А. Кокшенев, Н.Е. Курмаев, А.Ю. Лабедкий, Ф.И. Фурсов, Р.К. Чердизов, Исследование излучательных характеристик двойного газового лайнера с внешней плазменной оболочкой, *Изв. вузов. Физика*, том 59, 2016.

-
- [2] A.S. Chuvatin, L.I. Rudakov, B.V. Weber, F. Bayol, R. Cadiergues, Current multiplier to improve generator-to-load coupling for pulse-power generators, *Rev. Sci. Instr.*, vol. **76**, 063501, 2005, doi: 10.1063/1.1928450
- [3] A.S. Chuvatin, V. L. Kantsyrev, L. I. Rudakov, et al., Operation of a load current multiplier on a nanosecond mega-ampere pulse forming line generator, *Phys. Rev. Special topics - accelerators and beams*, vol. **13**, 010401, 2010, doi: 10.1103/PhysRevSTAB.13.010401
- [4] С.А. Чайковский, А.С. Чуватин, В.И. Орешкин, Трансформатор тока нагрузки тераваттного генератора МИГ, *ИТЭ*, № **2**, 67, 2012.
- [5] V.A. Kokshenev, A.A. Kim, B.M. Kovalchuk, et al., MA Load Current Multiplier, *14th Symposium on High Current Electronics*, Tomsk, Russia, 248, 2006.
- [6] A.S. Chuvatin, A. A. Kim, V. A. Kokshenev, et al., Design Criteria and Validation of a Vacuum Load Current Multiplier on a Mega-Ampere Microsecond Inductive Storage Generator, *Laser and Particle Beams*, vol. **28**, 361, 2010; doi: 10.1017/S0263034610000224
- [7] A.V. Shishlov, V.A. Kokshenev, B.M. Kovalchuk, F.I. Fursov, N.E. Kurmaev, N.A. Ratakhin, A.Yu. Labetsky, and A.G. Rousskikh, Planar wire arrays experiments on the GIT-12 generator with a load current multiplier, *16th Symposium on High Current Electronics*, Tomsk, Russia, 234, 2010.
- [8] V.A. Kokshenev, A.Yu. Labetsky, B.M. Kovalchuk, et al., Multi-Shell Plasma Flow Switch Experiments on the GIT12 Generator, *14th Symposium on High Current Electronics*, Tomsk, Russia, 272, 2006.
- [9] V.A. Kokshenev, B.M. Kovalchuk, F.I. Fursov, N.E. Kurmaev. Cascade from power amplifier and current transformer for Z-pinch experiments on the GIT-12 generator, *15th Symposium on High Current Electronics*, Tomsk, Russia, 269, 2008.
- [10] V.A. Kokshenev, B.M. Kovalchuk, F.I. Fursov, N.E. Kurmaev, A.V. Shishlov, Investigation of the MPOS-LCM cascade scheme on the GIT-12 generator, *16th Symposium on High Current Electronics, Tomsk, Russia*, 344, 2010.
- [11] V.A. Kokshenev, B.M. Kovalchuk, F.I. Fursov, N.E. Kurmaev, N.A. Ratakhin, A.V. Shishlov, Adapting of a plasma opening switch with a load current multiplier in experiments on the GIT-12 generator, *16th Symposium on High Current Electronics*, Tomsk, Russia, 273, 2010.
- [12] V.A. Kokshenev, A.Yu. Labetsky, A.V. Shishlov, N.E. Kurmaev, F.I. Fursov, R.K. Cherdizov Megaampere Z-pinch in the scheme of microsecond current generator GIT-12 with a load current doubler and plasma switch, *Изв. вузов. Физика*, **59**(9/2), 74, 2016.
- [13] В.А. Кокшенев и др., Плазменный источник излучения на основе газового лайнера с внешней плазменной оболочкой в цепи мегаамперного удвоителя тока нагрузки, *Изв. вузов. Физика*, **60**, 142, 2017.
- [14] A.L. Velikovich, F.L. Cochran and J. Davis, Suppression of Rayleigh-Taylor Instability in Z-Pinch Loads with Tailored Density Profiles, *Physical Review Letter*, **77**, 853, 1996; doi: 10.1103/PhysRevLett.77.853
- [15] V.A. Kokshenev, A.Yu. Labetsky, A.V. Shishlov, N.E. Kurmaev, F.I. Fursov, R.K. Cherdizov Optimization of parameters on neon gas puff with outer plasma shell in the experiments on the GIT-12 generator, *Изв. вузов. Физика*, **59**, 90, 2016.
- [16] R.K. Cherdizov; R.B. Baksht; V.A. Kokshenev; A.G. Rousskikh; A.V. Shishlov; D.L. Shmelev; A.S. Zhigalin; V.I. Oreshkin, Impact of the radial density profile on the Z-pinch stability at a microsecond rise time of the driving current, *Physics of Plasmas*, **30**, 042711, 2023, doi: 10.1063/5.0132064