04

Способ организации симметричного распределения разрядного тока в магнитоплазменном компрессоре при повышенных давлениях рабочего газа

© А.С. Пащина

Объединенный институт высоких температур РАН, Москва, Россия
E-mail: fgrach@mail.ru

Поступило в Редакцию 14 августа 2025 г.
В окончательной редакции 31 августа 2025 г.
Принято к публикации 1 сентября 2025 г.

Предложен и реализован способ организации разряда в магнитоплазменном компрессоре, обеспечивающий осесимметричное распределение разрядного тока. Это оказывается возможным благодаря разделению наружного электрода на изолированные сегменты, которые подключаются к выходу бинарной разветвленной электрической цепи, обеспечивающей автоподстройку электрических параметров за счет отрицательной обратной связи, создаваемой системой бифилярно связанных индукторов. Предложенное решение позволяет поднять порог рабочих давлений магнитоплазменного компрессора вплоть до атмосферных значений. Получен критерий выбора параметров бифилярных индукторов, обеспечивающий минимальный дисбаланс токов в секциях разрядника.

Ключевые слова: магнитоплазменный компрессор, коаксиальные электроды, осевая симметрия, автоподстройка, бинарная разветвленная электрическая цепь.

DOI: 10.61011/PJTF.2026.01.61922.20472

Магнитоплазменный компрессор (МПК) представляет собой электромагнитный ускоритель с коаксиальной геометрией электродов, обеспечивающий получение компрессионных течений типа „плазменный фокус“с экстремальными параметрами плазмы [1–3]. МПК находят применение в задачах термоядерного синтеза [1,4–6], приложениях магнитоплазменной аэродинамики [7], плазменных технологиях [8], в качестве мощных источников ультрафиолетового излучения [9] и др. В последнее время интерес к МПК поддерживается в связи с разработкой мощных электрореактивных двигателей, способных функционировать как в плотной атмосфере, так и в вакууме [2,7,10,11].

Важнейшим условием эффективного ускорения плазмы в коаксиальных разрядниках является обеспечение осевой симметрии распределения разрядного тока [1,12]. Это условие выполняется в ограниченном диапазоне рабочих давлений ($p = 10^{-5}$–$10\,\mathrm{Torr}$) до тех пор, пока существует диффузная форма разряда. Образование электродных пятен, шнурование разряда и другие факторы, которые происходят при давлениях выше $p > 100\,\mathrm{Torr}$, приводят к нарушению осевой симметрии разряда и в конечном итоге к срыву режима ускорения.

В [11] показано, что верхний порог рабочих давлений МПК с симметричным распределением разрядного тока может быть расширен вплоть до атмосферных значений за счет использования инициирующего разряда наносекундной длительности. Другой способ, предложенный в [13], заключается в разделении наружного электрода на изолированные сегменты и подключении каждого из них через управляемый коммутатор к отдельной батарее конденсаторов секционированного источника питания. В обоих случаях, однако, сохраняется вероятность нарушения симметрии разряда как на стадии пробоя, так и в течение основного разрядного импульса, например, из-за неконтролируемых флуктуаций параметров.

Рассматриваемый далее способ позволяет устранить названные недостатки. В его основе лежит разделение наружного электрода МПК на изолированные сегменты и организация между ними отрицательной обратной связи посредством бифилярно связанных индукторов, обеспечивающих синхронный поджиг и автоматическое выравнивание токов в случае возникновения дисбаланса. Бифилярные индукторы являются элементами бинарной разветвленной электрической цепи (БРЭЦ), а электрически изолированные сегменты наружного электрода разрядника — ее оконечными звеньями. Источником питания БРЭЦ может служить как источник переменного напряжения, так и емкостной накопитель, подключаемый через управляемый коммутатор.

Получить наглядное представление о принципах построения и функционирования БРЭЦ позволяет приведенная на рис. 1, *a* структурная схема трехуровневой БРЭЦ, в которой изолированные сегменты наружного электрода являются замыкающими звеньями третьего уровня. В общем случае число сегментов наружного электрода определяется уровнем n БРЭЦ и в точности равно числу ветвей ее последнего уровня, т. е. 2^n. Каждая пара магнитосвязанных индукторов обеспечивает отрицательную обратную связь между ветвями, выходящими из общего узла. Намотка индукторов производится на едином каркасе, а их электрическая коммутация, обес-

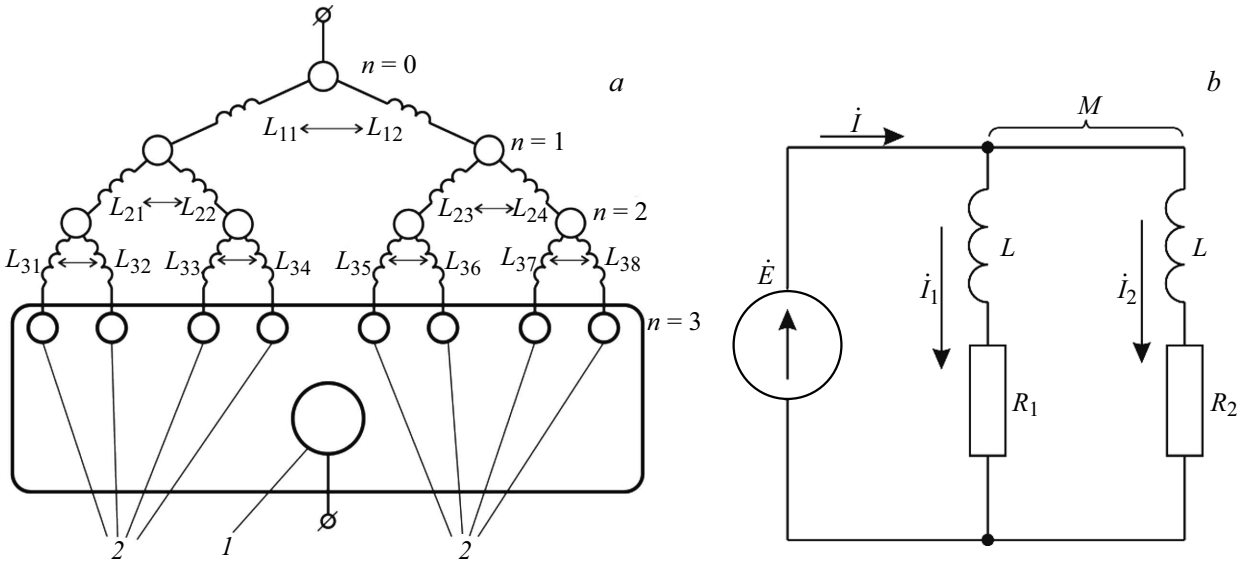

Рис. 1. *a* — структурная схема трехуровневой БРЭЦ с отрицательной обратной связью, создаваемой системой бифилярных индукторов, обеспечивающей автоподстройку электрических параметров соседних ветвей; *b* — эквивалентная схема одноуровневой БРЭЦ для оценки дисбаланса токов и выбора параметров индукторов. *1* — центральный электрод, 2 — секции наружного электрода.

печивающая встречное направление магнитных потоков, способствует выравниванию протекающих в них токов. Таким образом, одна пара индукторов верхнего уровня i способствует выравниванию токов в узлах подключения двух пар индукторов нижнего уровня $(i+1)$, а каждая пара индукторов последнего уровня n — выравниванию токов, замыкающихся на два сегмента разрядника. В трехуровневой БРЭЦ (рис. 1, *a*) эту функцию выполняют четыре пары индукторов третьего уровня: L_{31}/L_{32}, L_{33}/L_{34}, L_{35}/L_{36}, L_{37}/L_{38}, которые обеспечивают выравнивание токов в восьмисекционном разряднике (здесь и далее первый нижний индекс при L соответствует порядковому номеру уровня, второй нижний индекс — порядковому номеру ветви).

Общее число индукторов БРЭЦ уровня n равно числу ее ветвей: $N = \sum\limits_{m=0}^{n-1} 2^{n-m}$, а число бифилярно связанных пар равно числу узлов ветвления, т. е. вдвое меньше.

Для выбора параметров индукторов достаточно ограничиться рассмотрением оконечного каскада, так как именно его параметры в первую очередь определяют дисбаланс токов в ветвях нагрузки (разрядника). Эквивалентная схема ячейки оконечного каскада (рис. 1, *b*) сводится к одноуровневой БРЭЦ [14]. Полагаем, что цепь питается от источника переменного напряжения $\dot{E}$ (точкой вверху отмечены комплексные переменные), а ее ветви нагружены на различные активные сопротивления $R_1 > R_2$, моделирующие сопротивление плазмы в секциях разрядника.

Отношение токов в параллельных ветвях равно

$$\frac{\dot{I}_1}{\dot{I}_2} = \frac{R_2 + j\omega L(1+k)}{R_1 + j\omega L(1+k)}, \qquad (1)$$

откуда дисбаланс амплитудных значений токов

$$\delta|\dot{I}| = 1 - \frac{|\dot{I}_1|}{|\dot{I}_2|} = 1 - \sqrt{\frac{\left(\frac{R_2}{R_1}\right)^2 + \left(\frac{\omega L(1+k)}{R_1}\right)^2}{1 + \left(\frac{\omega L(1+k)}{R_1}\right)^2}}. \qquad (2)$$

Здесь $k = M/L$ — коэффициент связи пары индукторов ($k \approx 1$ для бифилярной намотки), M — коэффициент взаимной индукции, ω — круговая частота источника питания.

Из (1) и (2) следует, что необходимым условием снижения дисбаланса токов является превышение реактивной составляющей сопротивления ветви с наибольшим активным сопротивлением над ее активной составляющей: $\omega L(1+k) > R_1$. Например, при десятикратном различии активных сопротивлений ($R_1/R_2 = 10$) достаточно семикратного превышения реактивной составляющей сопротивления над активной, т. е.

$$\frac{\omega L(1+k)}{R_1} = \sqrt{\frac{(1-\delta|\dot{I}|)^2 - \left(\frac{R_2}{R_1}\right)^2}{1-(1-\delta|\dot{I}|)^2}} = 7, \qquad (3)$$

чтобы дисбаланс амплитудных значений токов не превышал $\delta|\dot{I}| < 1\,\%$. Соотношение (3) может рассматриваться в качестве критерия выбора параметров бифилярных индукторов в зависимости от требований по дисбалансу токов в секциях разрядника.

Выравниванию токов в параллельных ветвях способствует ЭДС взаимоиндукции пары индукторов, вызывающая синхронный рост и снижение напряжения соответственно на более высоком и более низком сопротивлении. Для приведенного выше примера отношение амплитудных значений напряжения примерно равно

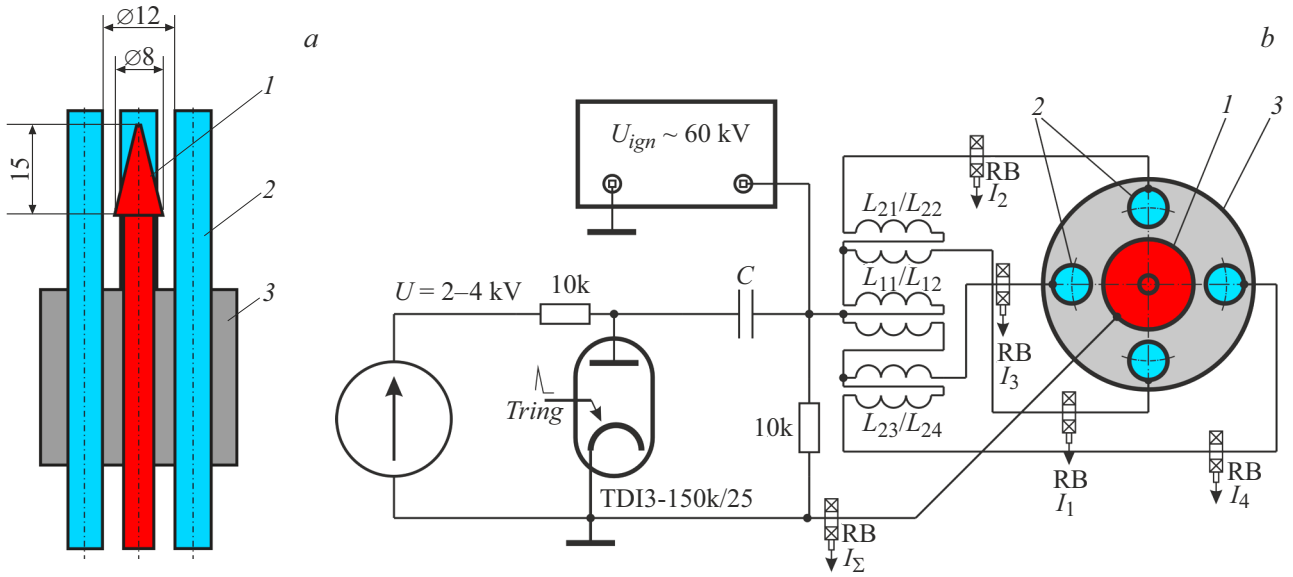

Рис. 2. *a* — конструктивная схема МПК с наружным электродом, выполненным из четырех электрически изолированных сегментов; *b* — принципиальная электрическая схема экспериментального стенда на основе двухуровневой БРЭЦ. *1* — центральный электрод, *2* —изолированные сегменты наружного электрода, *3* — корпус.

отношению активных сопротивлений:

$$\frac{|\dot{U}_1|}{|\dot{U}_2|} = 9.9 \approx \frac{R_1}{R_2}.$$

Это соответствует почти десятикратному превышению мощности на сопротивлении R_1 по отношению к R_2. Если нагрузкой является плазма, образующаяся в секциях разрядника, то повышение мощности в одной и снижение в другой секции вызовет соответствующий рост и снижение степени ионизации плазмы, что в итоге приведет к выравниванию электропроводности плазмы в обеих секциях.

Если по каким-то причинам зажигание разряда произошло лишь в одной секции, то протекание тока на этом участке приведет к повышению напряжения на электродах второй секции. В предельном случае ($R_1 = 0$, $R_2 = \infty$, $k = 1$) амплитуда напряжения на второй секции

$$\frac{|\dot{U}_2|}{|\dot{E}|} = \sqrt{\frac{1 + \left(\omega L(1+k)/R_1\right)^2}{1 + (\omega L/R_1)^2}}$$

вдвое превысит напряжение источника питания $\dot{E}$, что будет способствовать зажиганию разряда в этой секции. При этом величина тока в первой секции

$$\dot{I}_1 = \frac{\dot{E}}{R_1 + j\omega L}$$

будет находиться на минимальном уровне вплоть до момента зажигания разряда во второй секции.

Следует отметить два важных преимущества предлагаемого способа. Первое — это синхронизация нарастания тока во всех секциях разрядника. Это особенно важно, если пробой в секциях происходит неодновременно. Тогда синхронное нарастание тока во всех секциях произойдет лишь после зажигания разряда в последней секции. А до этого момента ток через секции, в которых уже произошел пробой, будет подавляться противоЭДС, создаваемой бифилярными индукторами. Второе преимущество — гарантированный поджиг разряда во всех секциях за счет того, что зажигание разряда на одной из них автоматически повлечет повышение напряжения на остальных секциях.

Исследования проведены на простейшей модификации МПК, содержащей центральный электрод в виде усеченного конуса и четыре изолированные секции наружного электрода (рис. 2, *a*), которые подключаются к выходу двухуровневой БРЭЦ (рис. 2, *b*). Напряжение от источника питания (батарея конденсаторов емкостью $C = 200-500\,\mu$F, заряжаемая до напряжения $U = 2-4$ kV) подается на ее вход. Двухуровневая БРЭЦ состоит из трех пар бифилярных индукторов, две из которых — L_{21}/L_{22} и L_{23}/L_{24} — обеспечивают автоподстройку токов, замыкающихся на сегменты наружного электрода МПК, а одна пара — L_{11}/L_{12} — обеспечивает выравнивание токов в узлах подключения бифилярных индукторов L_{21}/L_{22} и L_{23}/L_{24} (рис. 2, *b*). Индуктивность единичного индуктора, входящего в бифилярную пару, составляет $L_i = 21\,\mu$H, а индуктивность пары индукторов при встречной коммутации равна $L_b = 0.8\,\mu$H, что соответствует коэффициенту связи $k = 1 - L_b/2L = 0.98$.

Подача напряжения на наружные электроды МПК происходит в момент запуска тиратрона ТДИ3-150к/25СНП. Для инициации разряда

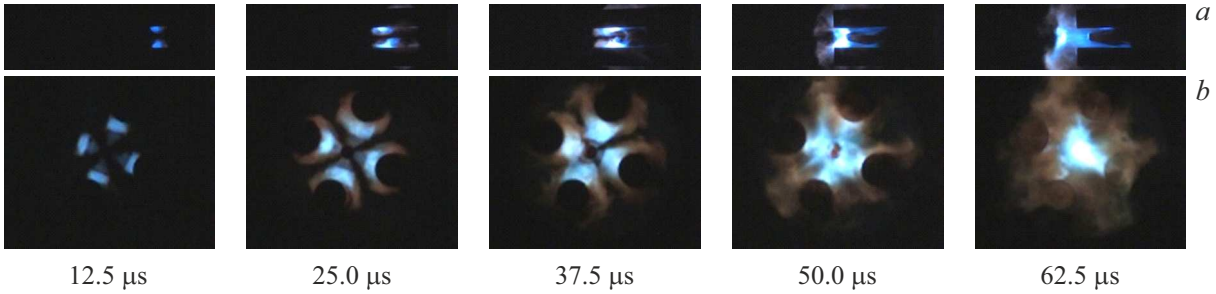

Рис. 3. Динамика разряда МПК с наружным электродом, выполненным из четырех электрически изолированных сегментов. *a* — вид сбоку, *b* — вид с торца. Разряд в воздухе при атмосферном давлении; напряжение накопительного конденсатора $U_C = 4$ kV, амплитуда разрядного тока $I_m = 30$ kA. Кадры получены с помощью скоростной видеокамеры Phantom VEO 310, длительность экспозиции 1 μs. Внизу указано время относительно момента зажигания разряда.

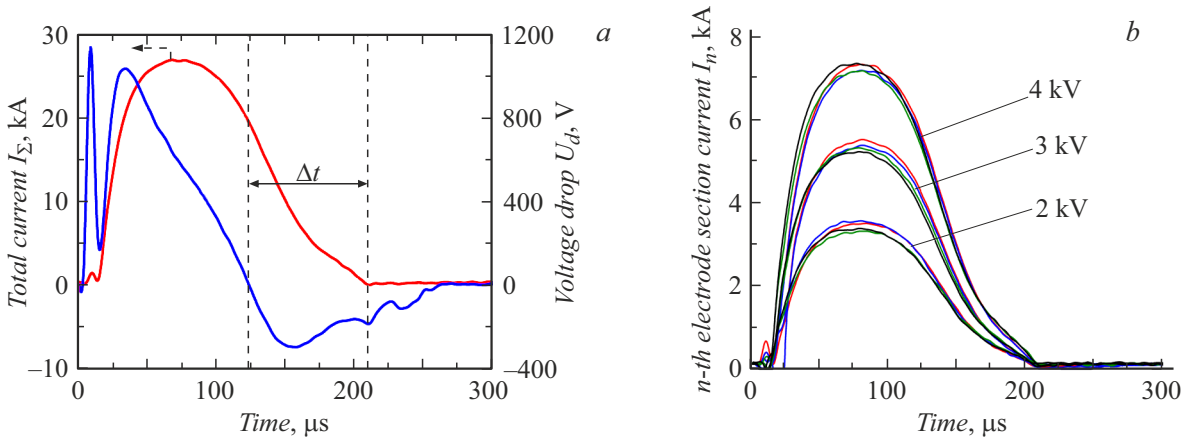

Рис. 4. Осциллограммы полного тока и напряжения на одном из электродов МПК при напряжении накопительного конденсатора 4 kV (*a*) и осциллограммы тока на изолированные сегменты наружного электрода при напряжении накопительного конденсатора 2, 3 и 4 kV (*b*).

используется высоковольтный источник с амплитудой напряжения до $U_{ign} = 60$ kV и длительностью импульса $t_{ign} \sim 10\,\mu$s. Основной разряд происходит с задержкой $t_{del} \sim 10\,\mu$s после запуска тиратрона. Синхронизация вспомогательного и основного разряда, а также регистрирующей аппаратуры осуществляется генератором задержанных импульсов BNC-575 (Berkley Nucleonics Corporation, США). Измерения токов (суммарного I_Σ и замыкающихся на секции наружного электрода I_1–I_4) проведены с помощью пояса Роговского (RB), который устанавливался в соответствующую ветвь электрической цепи (места установки отмечены на рис. 2, *b*). Для измерения напряжения использован высоковольтный пробник Tektronix P6015A.

На рис. 3 представлены кадры высокоскоростной видеосъемки (вид сбоку и вид с торца), характеризующие динамику развития разряда. Исследования проведены в атмосфере воздуха при нормальных условиях ($p = 760$ Torr, $T = 293$ K). В ходе многочисленных пусков было установлено, что зажигание разряда происходит одновременно на всех четырех секциях. Далее по мере нарастания разрядного тока происходит синхронное перемещение всех четырех плазменных каналов вдоль поверхности электродов по направлению к выходному сечению разрядника. При превышении порогового значения разрядного тока, величина которого для данных размеров разрядника (рис. 2, *a*) составляет 15 kA, на выходе происходит формирование плазменного фокуса (кадр, соответствующий моменту времени $t = 62.5\,\mu$s, на рис. 3).

На рис. 4, *a* представлены типичные осциллограммы суммарного тока и напряжения, измеренного на входе разветвленной цепи. При напряжении накопительной емкости $U = 4$ kV суммарная амплитуда разрядного тока достигает $I_\Sigma \approx 30$ kA, а длительность разрядного импульса составляет $\tau_d = 130\,\mu$s. Существование фазового сдвига между током и напряжением (на это указывает перемена знака напряжения задолго до момента погасания разряда ($\Delta t \approx 70\,\mu$s)) является характерным признаком ускорения плазмы за счет магнитогидродинамического механизма [15]. При выбранных параметрах

согласующих индукторов дисбаланс токов и напряжений на изолированных сегментах разрядника не превышает экспериментальной погрешности $\delta I < 10\,\%$, что подтверждается соответствующими измерениями, проведенными при различных напряжениях накопительной емкости (рис. 4, b).

Таким образом, предложенный способ полностью решает проблему осевой симметрии распределения разрядного тока в разрядниках с коаксиальной геометрией электродов независимо от давления рабочего газа. Область применения способа не ограничивается коаксиальными и/или многосекционными разрядниками. Способ может быть полезен, например, для организации синхронного зажигания и автоподстройки параметров в системе независимых разрядников, выравнивания токов в активных нагрузках и др.

Финансирование работы

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (государственное задание № 075-00269-25-00).

Конфликт интересов

Автор заявляет, что у него нет конфликта интересов.

Список литературы

[1] А.И. Морозов, Физика плазмы, **16** (2), 131 (1990).
[2] A.A. Kartasheva, K.M. Gutorov, V.L. Podkovyrov, E.A. Muravyeva, K.S. Lukyanov, N.S. Klimov, Phys. Plasmas, **31** (4), 043107 (2024). DOI: 10.1063/5.0198341
[3] И.Е. Гаркуша, Д.Г. Соляков, В.В. Чеботарев, В.А. Махлай, Н.В. Кулик, Физика плазмы, **45** (2), 179 (2019). DOI: 10.1134/S0367292119010050 [I.E. Garkusha, D.G. Solyakov, V.V. Chebotarev, V.A. Makhlay, N.V. Kulik, Plasma Phys. Rep., **45** (2), 166 (2019). DOI: 10.1134/S1063780X19010057].
[4] U. Shumlak, J. Appl. Phys., **127** (20), 200901 (2020). DOI: 10.1063/5.0004228
[5] E.J. Lerner, S.M. Hassan, I. Karamitsos, F. Von Roessel, Phys. Plasmas, **24** (10), 102708 (2017). DOI: 10.1063/1.4989859
[6] S. Singha, P.P. Kalita, A. Ahmed, P. Baruah, B. Bhattacharya, N.K. Neog, T.K. Borthakur, Phys. Plasmas, **32** (8), 083101 (2025). DOI: 10.1063/5.0272376
[7] I.C. Mashek, V.A. Lashkov, Y.F. Kolesnichenko, V.G. Brovkin, in *49th AIAA Aerospace Sciences Meeting including the New Horizons Forum and Aerospace Exposition* (Orlando, Florida, 2011), p. 1–6. DOI: 10.2514/6.2011-1274
[8] S. Auluck, P. Kubes, M. Paduch, M.J. Sadowski, V.I. Krauz, S. Lee, L. Soto, M. Scholz, R. Miklaszewski, H. Schmidt, A. Blagoev, M. Samuelli, Y.S. Seng, S.V. Springham, A. Talebitaher, C. Pavez, M. Akel, S.L. Yap, R. Verma, K. Kolacek, P.L.C. Keat, R.S. Rawat, A. Abdou, G. Zhang, T. Laas, Plasma, **4** (3), 450 (2021). DOI: 10.3390/plasma4030033
[9] V.V. Kuzenov, A.Y. Varaksin, S.V. Ryzhkov, Symmetry, **16** (9), 1200 (2024). DOI: 10.3390/sym16091200
[10] R.L. Burton, D.L. Caroll, J.W. Zimmerman, US patent 2023/0413414 A1 (2023).
[11] B. Göksel, I.C. Mashek, J. Phys.: Conf. Ser., **825**, 012005 (2017). DOI: 10.1088/1742-6596/825/1/012005
[12] А.К. Виноградова, А.И. Морозов, в сб. *Физика и применение плазменных ускорителей*, под ред. А.И. Морозова (Наука и техника, Минск, 1974), с. 103.
[13] Л.Я. Минько, В.М. Асташинский, *Устройство торцевого типа для получения плазменных струй*, АС СССР № 915772. Бюл. № 30 (15.10.1982).
[14] К.М. Поливанов, *Теоретические основы электротехники* (Энергия, М.–Л., 1965), ч. 1.
[15] J. Puric, I.P. Dojcinovic, V.M. Astashynski, M.M. Kuraica, B.M. Obradovic, Plasma Sources Sci. Technol., **13** (1), 74 (2004). DOI: 10.1088/0963-0252/13/1/010