

## Траекторный анализ в коллекторе с многоступенчатой рекуперацией энергии для прототипа гиротрона DEMO. Ч. III. Влияние параметров отработанного электронного потока

© О.И. Лукша,<sup>1</sup> А.С. Зуев,<sup>2</sup> А.Г. Малкин,<sup>1</sup> Е.С. Семенов,<sup>2</sup> П.А. Трофимов,<sup>1</sup> М.Ю. Глявин<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,  
195251 Санкт-Петербург, Россия

<sup>2</sup>Институт прикладной физики РАН,  
603950 Нижний Новгород, Россия  
e-mail: louksha@rphf.spbstu.ru

Поступило в Редакцию 31 января 2023 г.

В окончательной редакции 3 марта 2023 г.

Принято к публикации 11 марта 2023 г.

Определено влияние параметров отработанного электронного потока на возможности многоступенчатой рекуперации энергии в прототипе гиротрона, разрабатываемого для проекта DEMO. Оптимизированы характеристики электродов и магнитных катушек в коллекторе с четырехступенчатой рекуперацией с учетом распределения электронов по координатам и скоростям, полученного в результате расчета электронно-волнового взаимодействия в резонаторе. При траекторном анализе в коллекторе использовался секционированный электронный поток для подавления негативного влияния связей тороидального соленоида, используемого для создания азимутального магнитного поля. Показана возможность достижения полного КПД гиротрона равного примерно 78%, что близко к максимальному КПД при идеальной сепарации электронных фракций с разной энергией, при токе отраженных от коллектора электронов, не превышающем 1% от полного тока электронного пучка.

**Ключевые слова:** СВЧ электроника, гиротрон, электронный поток, рекуперация энергии.

DOI: 10.21883/JTF.2023.05.55468.14-23

### Введение

Рекуперация остаточной энергии отработанного электронного потока — широко используемый способ повышения эффективности вакуумных источников СВЧ излучения (см., например, [1]). В коллекторах с рекуперацией электроны тормозятся в электрическом поле, возвращая таким образом в электрическую сеть часть своей энергии, неизрасходованной при их взаимодействии с электромагнитным полем в электродинамической структуре. В подавляющем числе современных гиротронов, наиболее мощных источниках излучения в миллиметровом и субмиллиметровом диапазонах длин волн, используются коллекторы с одноступенчатой рекуперацией. Например, одноступенчатая рекуперация позволяет повысить полный КПД до 50–55% в гиротронах мегаваттного уровня мощности, предназначенных для нагрева плазмы и управления током в установках управляемого термоядерного синтеза [2–5], и даже до 60% в гиротронах, предназначенных для микроволновых технологий [6]. Для достижения еще более высокого КПД и дополнительного снижения тепловой нагрузки на коллектор желательнее осуществить переход к системам с многоступенчатой рекуперацией остаточной энергии электронов, для чего необходимо обеспечить сепарацию в пространстве электронных фракций с различной энергией и осаждение этих фракций на секции коллектора

под различными тормозящими потенциалами. Пространственная сепарация электронов в винтовых электронных потоках (ВЭП) гиротронов может быть обеспечена в результате их дрейфа в скрещенных электрическом и магнитном полях [7–10]. В СПбПУ проводятся исследования, направленные на определение возможностей эффективной сепарации электронов в продольном электрическом и азимутальном магнитном полях и разработку на этой основе коллекторов с многоступенчатой рекуперацией для гиротронов (например, [11,12]). В частности, сконструирована коллекторная система для гиротрона СПбПУ с частотой 74.2 GHz и выходной мощностью примерно 100 kW [13,14], в которой для создания азимутального магнитного поля используется соленоид с тороидальной намоткой.

На предшествующих этапах работы [15,16] были выполнены расчеты коллектора с четырехступенчатой рекуперацией для прототипа гиротрона с частотой 250 GHz, разрабатываемого для проекта DEMO [17,18]. Были определены распределения электрического и магнитного полей в коллекторной области, при которых достигается эффективная сепарация электронов отработанного ВЭП при малом отражении электронов от коллектора в сторону резонатора. Проанализированы как вариант с идеализированным распределением азимутального магнитного поля [15], которое создавалось проводником, расположенным на оси прибора, так и

система с азимутальным магнитным полем, создаваемым тороидальным соленоидом [16]. В обоих случаях характеристики частиц на входе в коллектор задавались „вручную“, используя типичный энергетический спектр электронов в отработанном ВЭП, определенный для мощных гиротронов на основании экспериментальных данных.

В настоящей статье, являющейся продолжением работ [15,16], представлены результаты моделирования коллектора для прототипа гиротрона DEMO, которые были получены с использованием анализа электронно-волнового взаимодействия в резонаторе этого гиротрона в рамках самосогласованной модели, реализованной в комплексе программ ANGEL [19,20], что позволило уточнить характеристики отработанного ВЭП. Все расчеты в коллекторной области были выполнены с помощью программного пакета 3D-моделирования CST Studio Suite [21].

## 1. Рабочий режим гиротрона и параметры электронного потока

Текущая версия прототипа гиротрона для проекта DEMO, разработанная в ИПФ РАН, характеризуется следующими основными параметрами: индукция магнитного поля в резонаторе  $B_0 \approx 9.5$  Т, ускоряющее напряжение  $U_0 = 55$  кВ, ток пучка  $I_b = 20$  А. Для определения массива данных о параметрах частиц в выходной плоскости резонатора  $z = 90$  мм ( $z = 0$  соответствует центральной плоскости резонатора) были выполнены (1) траекторный анализ в области формирования и транспортировки ВЭП до указанной выходной плоскости и (2) самосогласованный расчет электронно-волнового взаимодействия в резонаторе на основе усредненных уравнений. Особенности подобных расчетов описаны, например, в работах [19,20,22].

Траекторный анализ был выполнен с учетом начального скоростного разброса электронов для однородного и секционированного азимутальных распределений эмиссионного тока с термопояска катода. Количество центров эмиссии было выбрано равным 600 для однородного и 1176 для секционированного распределений. Разброс начальных скоростей задавался равным  $5.9\%$ <sup>1</sup> при гауссовой функции распределения по скоростям. Число фракций пучка с разной скоростью равнялось 13. В случае секционированного распределения эмиссия электронов отсутствовала в двух расположенных симметрично азимутальных секторах катода протяженностью  $45^\circ$  каждый. Секционирование ВЭП позволяет снизить негативное влияние магнитного поля связок тороидального соленоида, используемого для создания азимутального магнитного поля в области рекуперации [16]. Полученные в результате траекторного анализа

<sup>1</sup> Значения скоростного разброса, приведенные в настоящей работе, определялись как среднеквадратичное отклонение от среднего значения скорости.

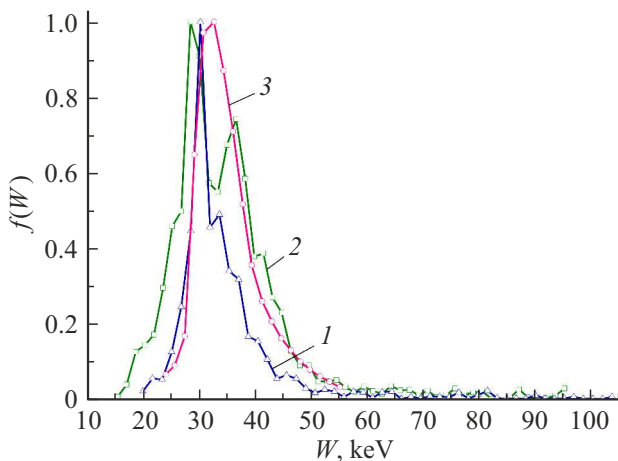
значения разброса поперечных скоростей в потоке, поступающем в резонатор, были равны 13.4% для однородного и 20.2% для секционированного распределений.

При моделировании электронно-волнового взаимодействия в резонатор поступали 57 фракций ВЭП с различным значением поперечной скорости, каждая из которых состояла из 17 фракций, различающихся фазой влета в рабочее пространство. Значения поперечной скорости задавались по скоростному спектру, определенному на этапе траекторного анализа в электронно-оптической системе. Рассчитывались параметры выходного излучения гиротрона и характеристики отработанного ВЭП с учетом неоднородного магнитного поля криосоленоида, омических потерь в резонаторе и провисания потенциала пучка. Мощность СВЧ излучения  $P_{out}$  составила 374.9 кВт при однородном и 363.3 кВт при секционированном распределении эмиссионного тока. При этом примерно 8% от мощности  $P_{el}$ , отобранной у электронного пучка в резонаторе, уходило на нагрев его стенки. Электронный КПД  $\eta_{el}$  определялся, используя соотношение

$$\eta_{el} = \frac{P_{el}}{I_b(U_0 - \Delta U)},$$

с учетом провисания потенциала пучка  $\Delta U$ . Значения указанных величин для однородного распределения:  $P_{el} = 406.6$  кВт,  $\Delta U = 3.65$  кВ,  $\eta_{el} = 39.6\%$ , а для секционированного распределения:  $P_{el} = 394.4$  кВт,  $\Delta U = 3.94$  кВ,  $\eta_{el} = 38.6\%$ . Секционирование ВЭП, если судить по полученным данным, приводило лишь к незначительному падению выходной мощности и электронного КПД.

Массивы данных, содержащие информацию о координатах, скоростях и токах в плоскости  $z = 90$  мм, были получены для  $530 \cdot 10^3$  частиц при однородном и для  $1039 \cdot 10^3$  частиц при секционированном распределении эмиссии с катода. Энергетические спектры электронов показаны на рис. 1. Кроме спектров для однородного и секционированного ВЭП здесь изображен упрощенный спектр, использованный ранее в работах [15,16]. Принципиальное отличие спектров для реальных ВЭП по сравнению с упрощенным состоит в наличии частиц с большими значениями энергии, превышающими энергию  $eU_0 = 55$  кВ. При этом ширина спектра для секционированного ВЭП примерно в два раза больше, чем для однородного. Новые данные о характеристиках отработанного электронного потока, полученные после расчетов взаимодействия электронов с электромагнитным полем в резонаторе, потребовали внесения изменения в конструкцию и режимы работы коллектора для достижения максимальной эффективности рекуперации остаточной энергии электронов. При моделировании коллектора входной плоскостью, в которой располагались источники частиц, являлась плоскость  $z = 430$  мм. Для получения входного интерфейса были выполнены расчеты траекторий частиц в магнитном поле, создаваемом основным соленоидом гиротрона, в области между  $z = 90$  и 430 мм. Траекторный анализ в коллекторной



**Рис. 1.** Распределения электронов по энергиям в обработанном пучке гиротрона: 1 — однородный ВЭП, 2 — секционированный ВЭП, 3 — упрощенное распределение, использованное в работах [14,15].

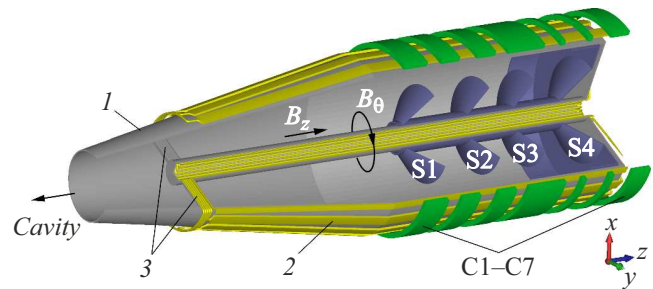
области (см. разд. 3) был выполнен только для секционированного ВЭП, в котором число частиц (трубок тока) было уменьшено до примерно  $25 \cdot 10^3$ .

## 2. Оптимизация распределения магнитного поля в коллекторной области

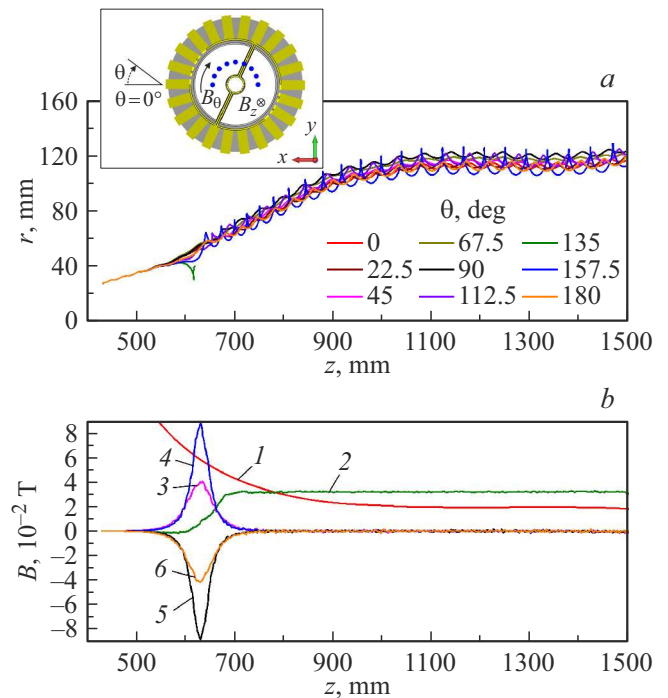
Основные элементы модернизированного коллектора для гиротрона DEMO (рис. 2) подобно описанным в работе [16]. Важно, что размеры этого коллектора (длина и радиус цилиндрической части) не отличаются заметно от соответствующих размеров коллектора без рекуперации [17,18]. В цилиндрической части корпуса коллектора 1 с внутренним радиусом 160 mm расположены секции S1–S4 под отрицательными потенциалами, используемые для торможения электронов. Корректирующие катушки C1–C7 в комбинации с основной магнитной системой гиротрона обеспечивают требуемое распределение продольного магнитного поля. Соленоид с тороидальной намоткой 2 используется для создания азимутального магнитного поля. Торцевые проводники этого соленооида со стороны, ближней к резонатору, собраны в две радиальные связки 3, располагающиеся в соединительных трубках.

Распределение магнитного поля было оптимизировано по результатам расчета траекторий „одиночных“ электронов. Задавались точечные источники частиц в плоскости  $z = 430$  mm. Начальная энергия и радиальная координата  $y$  всех частиц были одинаковыми и равнялись соответственно 36 keV и 27 mm, а азимутальная координата  $\theta$  была различной. На рис. 3 приведены проекции электронных траекторий на плоскость  $r-z$  для разных значений координаты  $\theta$  в диапазоне от  $0^\circ$  до  $180^\circ$

(рис. 3, a) и распределения различных компонент индукции магнитного поля вдоль продольной координаты  $z$  (рис. 3, b). Вследствие симметрии системы траектории электронов для  $\theta$  в диапазоне от  $180^\circ$  до  $360^\circ$  будут совпадать с приведенными на рис. 3, a. На этом рисунке также показано взаимное положение точек эмиссии и связок тороидального соленооида. Азимутальное положение связок, соответствующее координатам  $\theta = 115^\circ$



**Рис. 2.** Схематическое изображение коллекторной области гиротрона: 1 — корпус коллектора, 2 — тороидальный соленоид, 3 — связки, S1–S4 — секции коллектора, C1–C7 — корректирующие катушки.



**Рис. 3.** a — проекции траекторий „одиночных“ электронов с различной азимутальной координатой точки старта  $\theta$ ; b — распределения индукции магнитного поля, определенной при разных значениях координат  $r$  и  $\theta$ , вдоль координаты  $z$  для поля основной магнитной системы гиротрона и корректирующих катушек при  $r = 110$  mm,  $\theta = 0^\circ$  (1), азимутального поля тороидального соленооида при  $r = 110$  mm,  $\theta = 0^\circ$  (2), продольного поля тороидального соленооида при  $r = 50$  mm и  $\theta = 72.5^\circ$  (3),  $95^\circ$  (4),  $135^\circ$  (5),  $157.5^\circ$  (6). На вставке показано азимутальное положение точек эмиссии „одиночных“ электронов и связок тороидального соленооида.

и  $295^\circ$ , в свою очередь было выбрано с учетом положения секторов ВЭП, в которых отсутствуют электроны (см. ниже). Частицы с большими энергиями, присутствующие в спектре отработанного ВЭП (рис. 1), могут приобретать значительную поперечную скорость в области связей тороидального соленоида. Двигаясь по траекториям с большими ларморовскими радиусами, эти электроны могут оседать на стенках коллектора, не достигая секций с потенциалами, соответствующими их энергии. Для снижения тока на корпус коллектора был уменьшен средний радиус пучка в области рекуперации ( $z > 1000$  mm) за счет увеличения индукции продольного магнитного поля по сравнению с коллектором, описанным в [16]. В этой области индукция продольного магнитного поля  $B_z$  была равна примерно 0.02 Т, а азимутального поля  $B_\theta$  — примерно 0.032 Т (рис. 3, b). Эти значения были определены на среднем радиусе пучка  $r = 110$  mm.

Для эффективной работы рекуператора важно обеспечить минимальный разброс радиального положения траекторий электронов с разными значениями азимутальной координаты точки влета в коллектор при отсутствии напряжения на секциях. Как показали предыдущие расчеты [16], этого можно добиться выбором положительного направления азимутального магнитного поля (рис. 2 и 3), а также подбором необходимой величины поля основной магнитной системы гиротрона и корректирующих катушек в области связей тороидального соленоида ( $z \approx 630$  mm) для компенсации паразитного влияния продольной компоненты поля этого соленоида (рис. 3, b). Видно (рис. 3, a), что при оптимизированном распределении магнитного поля отсутствует заметный разброс радиального положения электронных траекторий в области рекуперации.

Однако после проведенной оптимизации еще остаются электроны, двигающиеся в непосредственной близости от связей тороидального соленоида, у которых заметно искривляются траектории под действием паразитного поля этого соленоида. Такие электроны могут не достигать секции с потенциалом, соответствующим их энергии, а оседают на других электродах коллектора, либо отражаются от коллектора в сторону резонатора. В обоих случаях снижается эффективность работы рекуператора. Например, электрон с начальной координатой  $\theta = 135^\circ$  оседает на соединительной трубке, в которой расположена связка (рис. 3, a). Видно при этом, что на азимуте  $\theta = 135^\circ$  суммарное продольное поле, которое определяется суммой значений  $B$  на кривых 1 и 5, меняет свое направление с положительного на отрицательное и обратно при движении вдоль оси  $z$  (рис. 3, b). Для устранения негативного влияния таких электронов на работу рекуператора было выполнено секционирование ВЭП, описанное в разд. 1.

### 3. Траекторный анализ в коллекторе с четырехступенчатой рекуперацией

Для спектра секционированного ВЭП (рис. 1), в котором были выделены 1000 энергетических фракций, максимальный полный КПД при четырехступенчатой рекуперации с идеальной сепарацией, когда каждая энергетическая фракция из спектра отработанного ВЭП попадает на секцию под потенциалом, соответствующим ее энергии [8,12], составил 80.3%. Это значение было получено путем перебора значений  $U_{S1}-U_{S4}$  с шагом 0.2 kV при условии, что от коллектора отражается 1% тока ВЭП с электронами, имеющими наименьшую энергию. Для сравнения значения максимального полного КПД при другом числе ступеней рекуперации  $N$  равны: 68.8% ( $N=2$ ), 76.8% ( $N=3$ ), 82.9% ( $N=5$ ), 85.0% ( $N=6$ ). Как и в предыдущих работах [11,12,15,16], выбор числа ступеней, равного четырем, — это результат компромисса между желанием достичь максимального полного КПД гиротрона и трудностями практической реализации системы рекуперации с большим числом ступеней.

Четыре секции конусной формы под тормозящими потенциалами располагались в области рекуперации (рис. 2). Были уменьшены радиусы оснований этих секций по сравнению с описанными в [16] из-за снижения среднего радиуса пучка. Для выбора потенциалов секций  $U_{S1}-U_{S4}$  были использованы результаты расчетов полного КПД гиротрона при идеальной сепарации.

Положение частиц отработанного ВЭП в входной плоскости коллектора показано на рис. 4. Наблюдается смещение электронов в радиальном направлении в областях, прилегающих к вырезанным из ВЭП секторам, под действием скрещенных азимутального электрического поля пространственного заряда и продольного магнитного поля (диокотронный эффект). Протяжен-

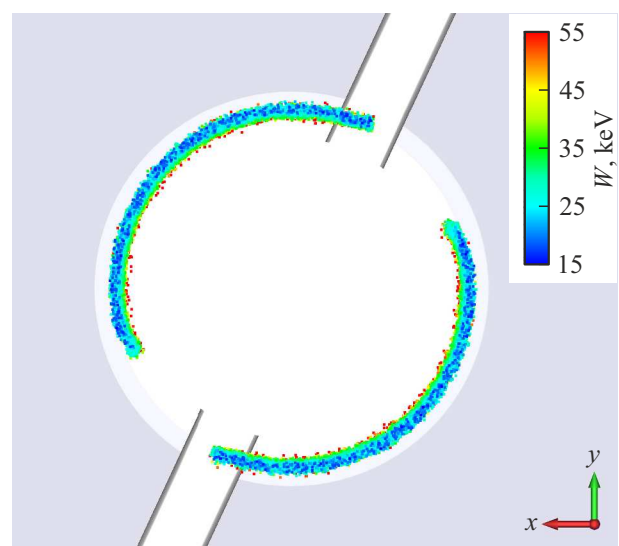
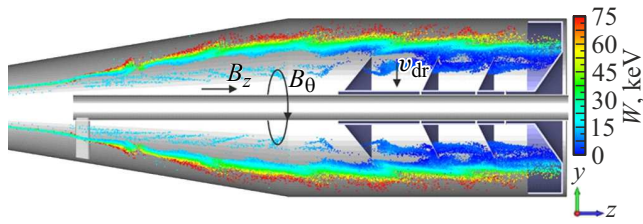


Рис. 4. Распределение частиц в плоскости  $x-y$  ( $z = 430$  mm) для секционированного ВЭП. Цвет соответствует энергии частиц  $W$ .



**Рис. 5.** Положение частиц в плоскости  $y-z$  ( $x = 0$ ). Цвет соответствует энергии частиц  $W$ .

ность секторов в этой плоскости составляет примерно  $40^\circ$ . Их азимутальное положение ( $117^\circ < \theta < 157^\circ$  и  $297^\circ < \theta < 337^\circ$ ) по отношению к связкам тороидального соленоида было оптимизировано для достижения минимального отражения электронов от коллектора.

Незначительная коррекция потенциалов  $U_{S1}-U_{S4}$ , полученных при идеальной сепарации, была выполнена для достижения максимального полного КПД гиротрона в результате серии расчетов электронных траекторий в коллекторе. При  $U_{S1} = -18.8$  кВ,  $U_{S2} = -27.4$  кВ,  $U_{S3} = -34.3$  кВ,  $U_{S4} = -40.7$  кВ (потенциал корпуса коллектора  $U_{coll} = 0$ ) значения мощности, рассеиваемой на секциях и корпусе, составили соответственно  $P_{S1} = 22.7$  кВт,  $P_{S2} = 27.3$  кВт,  $P_{S3} = 16.4$  кВт,  $P_{S4} = 39.9$  кВт,  $P_{coll} = 1.2$  кВт при коэффициенте отражения от коллектора 0.99%. Суммарная мощность  $P_{diss}$ , рассеиваемая на коллекторе, таким образом равняется 107.5 кВт. При мощности  $P_{el} = 394.4$  кВт полный КПД гиротрона

$$\eta_t = \frac{P_{el}}{P_{el} + P_{diss}} = 78.6\%,$$

а КПД коллектора (рекуперации)  $\eta_{coll} = 84.8\%$ . Здесь при вычислении полного КПД, как и в предыдущих расчетах [15,16], не учитывались потери мощности, связанные с нагревом стенок резонатора.

Таким образом, проведенная оптимизация геометрии коллекторных секций и распределения полей позволила получить значение полного КПД гиротрона лишь немного меньше, чем максимальный КПД в четырехступенчатой системе рекуперации при идеальной сепарации электронов. Учет реального распределения электронов по координатам и скоростям в отработанном ВЭП привел к снижению КПД примерно на 5% по сравнению со значением, полученным в работе [16] при упрощенном способе задания параметров ВЭП.

На рис. 5 показано положение частиц в плоскости  $y-z$ , полученное как результат пересечения винтообразных электронных траекторий с этой плоскостью. Можно видеть, что, двигаясь в тормозящем электрическом поле в области рекуперации, электроны смещаются под действием скрещенных  $E_z$  и  $B_\theta$  полей в радиальном направлении, в данном случае в сторону меньших радиусов при выбранном направлении поля  $B_\theta$ . Большинство электронов осаждаются на задних стенках секций после изменения направления их продольного

движения. С ростом начальной энергии электронов они проходят большее расстояние вдоль оси  $z$  и осаждаются на секции под более отрицательным потенциалом.

Расчитанное распределение тепловой нагрузки по поверхностям секций коллектора было подобным описанному в работе [16]. Максимальная плотность мощности при этом равнялась примерно  $0.3$  кВт/см<sup>2</sup>, что приемлемо для работы гиротрона в квазинепрерывном режиме. Дальнейшее увеличение мощности ВЭП и переход к мегаваттному уровню выходной СВЧ мощности потребует, очевидно, дополнительного уточнения конструкции коллектора с учетом интенсивного водяного охлаждения.

## Заключение

Таким образом, разбитое на три части исследование было направлено на определение возможностей реализации многоступенчатой рекуперации энергии отработанного электронного потока в гиротроне, который был разработан как прототип для гиротрона DEMO. В первой части [15] показаны перспективы метода пространственной сепарации электронных фракций с разной энергией в скрещенных продольном электрическом и азимутальном магнитном полях, который может быть использован для реализации многоступенчатой рекуперации. Во второй части [16] определены условия эффективной рекуперации при использовании соленоида с тороидальной намоткой как источника азимутального магнитного поля. В настоящей работе были уточнены геометрия электродов и магнитных катушек в коллекторной области гиротрона с учетом реального распределения электронов по координатам и скоростям в отработанном ВЭП, полученного в результате расчетов электронно-волнового взаимодействия в резонаторе.

Основным ограничением в реализации предложенной конструкции рекуператора может считаться наличие торцевых проводников тороидального соленоида, которые расположены со стороны, ближней к резонатору. Для увеличения прохождения электронов в область рекуперации эти проводники собраны в две связки. Негативное влияние магнитного поля этих связок на эффективность рекуперации и коэффициент отражения электронов от коллектора снижается за счет секционирования электронного потока.

Показано, что в разработанном коллекторе с четырехступенчатой рекуперацией может быть достигнуто значение полного КПД, равное примерно 78% для реального ВЭП гиротрона, которое близко к максимальному КПД при идеальной сепарации фракций электронного пучка с разной энергией. Данное значение КПД получено для гиротрона с секционированным катодом, с двух секторов которого, протяженностью  $45^\circ$ , отсутствует эмиссия электронов. Секционирование ВЭП позволило, в частности, снизить коэффициент отражения электронов от коллектора до примерно 1%. Продолжением



настоящей работы может быть дальнейшее совершенствование источника азимутального магнитного поля, что позволит упростить конструкцию коллектора.

### Благодарности

Авторы признательны В.Е. Запевалову за ценные замечания и интерес к работе.

### Финансирование работы

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 22-29-00136). Часть результатов была получена с использованием вычислительных ресурсов суперкомпьютерного центра Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого (<http://www.scc.spbstu.ru>).

### Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

### Список литературы

- [1] H.G. Kosmahl. *Proc. IEEE*, **70** (11), 1325 (1982). DOI: 10.1109/PROC.1982.12481
- [2] K. Sakamoto, M. Tsuneoka, A. Kasugai, T. Imai, T. Kariya, K. Hayashi, Y. Mitsunaka. *Phys. Rev. Lett.*, **73** (26), 3532 (1994). DOI: 10.1103/PhysRevLett.73.3532
- [3] M.Y. Glyavin, A.N. Kuftin, N.P. Venediktov, V.E. Zapevalov. *Int. J. Infrared Millimeter Waves*, **18**, 2129 (1997). DOI: 10.1007/BF02678255
- [4] M. Thumm. *J. Infrared Millimeter Terahertz Waves*, **41** (1), 1 (2020). DOI: 10.1007/s10762-019-00631-y
- [5] V.N. Manuilov, M.V. Morozkin, O.I. Luksha, M.Y. Glyavin. *Infrared Physics and Technology*, **91**, 46 (2018). DOI: 10.1016/j.infrared.2018.03.024
- [6] M.V. Morozkin, M.Y. Glyavin, G.G. Denisov, A.G. Luchinin. *Int. J. Infrared Millimeter Waves*, **29** (11), 1004 (2008). DOI: 10.1007/s10762-008-9408-z
- [7] I.Gr. Pagonakis, J.P. Hogge, S. Alberti, K.A. Avramides, J.L. Vomvoridis. *IEEE Trans. Plasma Sci.*, **36** (2), 469 (2008). DOI: 10.1109/TPS.2008.917943
- [8] O.I. Luksha, П.А. Трофимов. *Письма в ЖТФ*, **41** (18), 38 (2015). [O.I. Louksha, P.A. Trofimov. *Tech. Phys. Lett.*, **41** (9), 884 (2015). DOI: 10.1134/S1063785015090230]
- [9] C. Wu, I.G. Pagonakis, K.A. Avramidis, G. Gantenbein, S. Illy, M. Thumm, J. Jelonnek. *Phys. Plasmas*, **25** (3), 033108 (2018). DOI: 10.1063/1.5016296
- [10] B. Ell, C. Wu, G. Gantenbein, S. Illy, M. Misko, I.G. Pagonakis, J. Weggen, M. Thumm, J. Jelonnek. *IEEE Trans. Electron Devices*, **70** (3), 1299 (2023). DOI: 10.1109/TED.2023.3234885
- [11] O.I. Louksha, P.A. Trofimov. *Proc. 18th Int. Vacuum Electronics Conf., IVEC 2017* (London, United Kingdom, 2017), p. 1. DOI: 10.1109/IVEC.2017.8289518
- [12] O.I. Luksha, П.А. Трофимов. *ЖТФ*, **89** (12), 1988 (2019). DOI: 10.21883/JTF.2019.12.48501.179-19 [O.I. Louksha, P.A. Trofimov. *Tech. Phys.*, **64** (12), 1889 (2019). DOI: 10.1134/S1063784219120156]
- [13] Д.В. Касьяненко, О.И. Лукша, Б. Пиосчик, Г.Г. Соминский, М. Тумм. *Известия вузов. Радиофизика*, **47** (5–6), 463 (2004). [D.V. Kas'yanenko, O.I. Louksha, B. Piosczyk, G.G. Sominsky, M. Thumm. *Radiophys. Quantum Electron*, **47** (5–6), 414 (2004). DOI: 10.1023/B:RAQE.0000046315.10190.1c]
- [14] O. Louksha, B. Piosczyk, G. Sominski, M. Thumm, D. Samsonov. *IEEE Trans. Plasma Sci.*, **34** (3), 502 (2006). DOI: 10.1109/TPS.2006.875779
- [15] O.I. Лукша, П.А. Трофимов, В.Н. Мануилов, М.Ю. Глявин. *ЖТФ*, **91** (1), 125 (2021). DOI: 10.21883/JTF.2021.07.50960.5-21 [O.I. Louksha, P.A. Trofimov, V.N. Manuilov, M. Yu. Glyavin. *Tech. Phys.*, **66** (1), 118 (2021). DOI: 10.1134/S1063784221010138]
- [16] O.I. Лукша, П.А. Трофимов, В.Н. Мануилов, М.Ю. Глявин. *ЖТФ*, **91** (7), 1182 (2021). DOI: 10.21883/JTF.2021.07.50960.5-21 [O. I. Louksha, P. A. Trofimov, V. N. Manuilov, M. Yu. Glyavin. *Tech. Phys.*, **66** (8), 992 (2021). DOI: 10.1134/S1063784221070082]
- [17] M. Glyavin, V. Manuilov, M. Morozkin. *Proc. 43rd Int. Conf. Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves* (Nagoya, Japan, 2018), 8510139.
- [18] G.G. Denisov, M.Yu. Glyavin, A.P. Fokin, A.N. Kuftin, A.I. Tsvetkov, A.S. Sedov, E.A. Soluyanov, M.I. Bakulin, E.V. Sokolov, E.M. Tai, M.V. Morozkin, M.D. Proyavin, V.E. Zapevalov. *Rev. Scientific Instrum.*, **89** (8), 084702 (2018). DOI: 10.1063/1.5040242
- [19] Е.С. Семенов, О.П. Планкин, Р.М. Розенталь. *Известия вузов. Прикладная нелинейная динамика*, **23** (3), 94 (2015). DOI: 10.18500/0869-6632-2015-23-3-94-105
- [20] Е.С. Семенов, А.С. Зуев, А.П. Фокин. *Информационные и математические технологии в науке и управлении*, **1** (25), 35 (2022). DOI: 10.38028/ESI.2022.25.1.003
- [21] CST Studio Suite. *Electromagnetic Field Simulation Software* [Электронный ресурс] Режим доступа: <https://www.3ds.com/products-services/simulia/products/cst-studio-suite/>
- [22] Н.А. Завольский, В.Е. Запевалов, М.А. Моисеев. *Известия вузов. Радиофизика*, **64** (3), 192 (2021). DOI: 10.52452/00213462\_2021\_64\_03\_192 [N.A. Zavol'sky, V.E. Zapevalov, M.A. Moiseev. *Radiophys. Quantum Electron.*, **64** (3), 175 (2021). DOI: 10.1007/s11141-021-10121-8]