

# Измерения в гиротроне с многоступенчатой системой рекуперации остаточной энергии электронов

О.И. Лукша, А.Г. Малкин, П.А. Трофимов

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

**Аннотация:** коллектор с многоступенчатой рекуперацией нового типа был изготовлен и протестирован в экспериментах с гиротроном 4-мм диапазона длин волн. Представлены результаты первых экспериментов, в которых были достигнуты значения полного КПД  $\sim 70\%$  для четырехступенчатой и  $\sim 72\%$  для пятиступенчатой систем рекуперации. Обсуждаются возможности дальнейшего увеличения эффективности гиротрона.

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

## 1. Введение

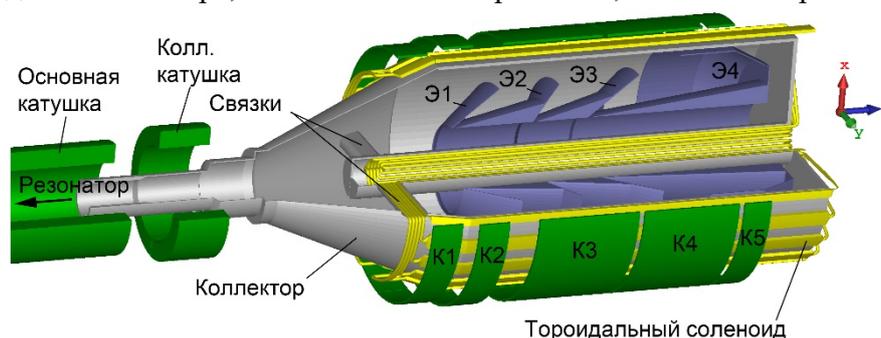
В настоящее время гиротроны занимают лидирующее положение среди источников мощного СВЧ-излучения миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов длин волн [1]. Они практически незаменимы в таком важном приложении как нагрев плотной плазмы и управление током в установках с магнитным удержанием, предназначенных для исследования способа получения энергии с помощью управляемого термоядерного синтеза. Повышение эффективности гиротронов – это одна из основных задач, стоящих сегодня перед разработчиками таких устройств. При использовании коллекторов с одноступенчатой рекуперацией остаточной энергии электронов полный КПД гиротронов может быть повышен до 50–60 % [2 – 4]. Дальнейшее повышение эффективности возможно при использовании систем с многоступенчатой рекуперацией. В таких коллекторах требуется обеспечить пространственное разделение фракций отработанного винтового электронного пучка (ВЭП) с разной энергией. Сложности реализации многоступенчатых коллекторов в гиротронах связаны с наличием остаточного магнитного поля в коллекторной области, а также с имеющимся в отработанном ВЭП разбросом электронов по скоростям и координатам [5 – 7].

В СПбПУ был разработан способ пространственной сепарации электронов ВЭП в скрещенных продольном электрическом и азимутальном магнитном полях [8]. На базе данного метода были спроектированы многоступенчатые коллекторы для различных гиротронов [9, 10]. В данной статье представлены данные первых экспериментов, которые были выполнены в гиротроне СПбПУ с частотой 74,2 ГГц и выходной мощностью  $\sim 100$  кВт с 4-х ступенчатым коллектором.

## 2. Особенности конструкции гиротрона

Гиротрон СПбПУ оснащен набором диагностик, предназначенных для определения параметров ВЭП и характеристик выходного СВЧ-излучения [11, 12]. В частности, имеется возможность определять азимутальное распределение плотности тока эмиссии с катода магнетронно-инжекторной пушки (МИП). Для этого измеряется ток электронов, прошедших через малое отверстие диаметром 1 мм в аноде, в зависимости от азимутального положения катода в отсутствие магнитного поля. Расчетный рабочий режим гиротрона характеризуется ускоряющим напряжением  $U_0 = 30$  кВ, током пучка  $I_n = 10$  А и индукцией магнитного поля в резонаторе  $B_0 \approx 2,75$  Тл.

Коллектор гиротрона был спроектирован и изготовлен, основываясь на результатах численного моделирования, описанного в работе [13]. В расчетах и в экспериментах был использован секционированный эмиттер, у которого с двух секторов длиной  $\Delta\theta$  отсутствовала эмиссия электронов (см. ниже). Полученный в расчетах [13] оптимальный режим работы гиротрона с максимальным полным КПД характеризуется следующими параметрами: 1) в поступающем в резонатор секционированном ВЭП ( $\Delta\theta = 45^\circ$ ) средний пич-фактор равен 1,55, а СКО-значение разброса поперечной скорости равно 5,26%; 2) выходная СВЧ-мощность на рабочей моде  $TE_{12,3}$  равна 135,3 кВт, а электронный КПД равен 45,1% ( $B_0 = 2,747$  Тл); 3) при оптимизированных параметрах 4-х ступенчатой коллекторной системы полный КПД гиротрона равен 79,66% при коэффициенте отражения электронов от коллектора 0,99%. Модель коллектора, использованная в расчетах, показана на рис. 1.

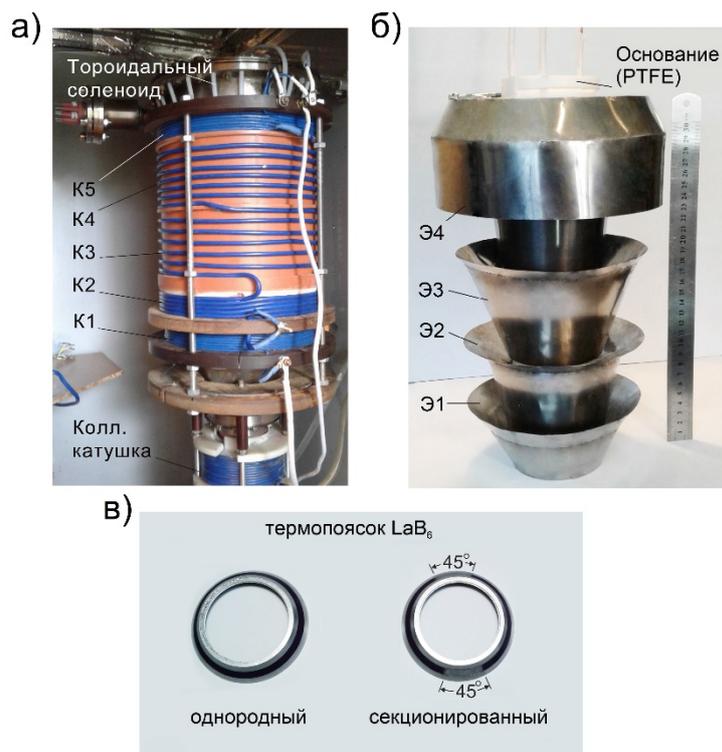


**Рисунок 1.** Схематическое изображение коллекторной области гиротрона: Э1–Э4 – коллекторные электроды под отрицательными потенциалами; К1–К5 – корректирующие катушки.

Фотография коллекторной области гиротрона приведена на рис. 2(а). Для поглощения выходной СВЧ-мощности используется калориметрическая нагрузка проходного типа, установленная между резонатором и коллектором в области коллекторной катушки. Высоковольтный изолятор отделяет корпус коллектора от заземленного корпуса гиротрона. Это позволяет измерять ток электронов, осаждающихся на корпусе коллекторе, а также подавать на него задерживающее напряжение (не более  $\sim 3$  кВ).

В гиротроне используется импульсная магнитная система. Корректирующие катушки К1–К5 предназначены для оптимизации распределения продольного магнитного поля в коллекторе. Азимутальное магнитное поле создается с помощью соленоида с тороидальной намоткой. Торцевые проводники этого соленоида со стороны, ближней к резонатору, собраны в две связки (рис. 1). При использовании секционированного ВЭП снижается негативное влияние магнитного поля этих связок на траектории электронов в коллекторной области [13].

Электрическое поле в коллекторной области создается с помощью четырех электродов конусной формы, изолированных друг от друга и от корпуса коллектора (рис. 1 и рис. 2). Электроды располагаются в цилиндрической части корпуса с внутренним радиусом 104,5 мм. Радиус основания конуса первого электрода Э1 равен 79,5 мм. Электроды были закреплены на основании из фторопласта, показанном на рис. 2(б). Это основание, в свою очередь, крепилось к внутренней трубе коллектора, внутри которой располагаются проводники внутренней обмотки тороидального соленоида. Напряжения на электродах  $U_{Э1}-U_{Э4}$ ,  $U_{колл}$  в проведенных экспериментах создавались за счет протекания токов через электроды  $I_{Э1}-I_{Э4}$ ,  $I_{колл}$  и резисторы с известным сопротивлением  $R_{Э1}-R_{Э4}$ ,  $R_{колл}$ , подключенные последовательно. В этом случае на электродах коллектора создается отрицательный потенциал относительно заземленного корпуса гиротрона.



**Рисунок 2.** Фотографии а) коллектора гиротрона, б) коллекторных электродов, в) однородного и секционированного эмитирующих поясков.

На рис. 2(в) показаны фотографии стандартного гексаборид лантанового эмиссионного пояска с однородным покрытием и использованного в проведенных экспериментах секционированного пояска с длиной секторов без эмиссионного покрытия  $\Delta\theta = 45^\circ$ . Гиротрон эксплуатировался в режиме разовых импульсов длительностью десятки микросекунд с паузой между импульсами  $\sim 1$  минута.

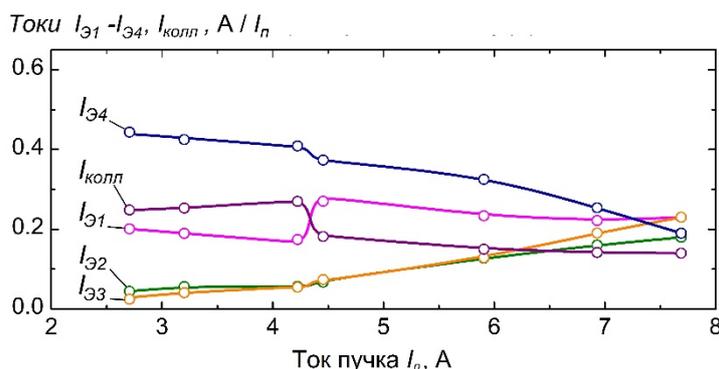
### 3. Экспериментальные результаты

Тестовые эксперименты были выполнены в режиме, когда отсутствовала выходная СВЧ-мощность ( $I_n < 3$  А) и не подавались напряжения на электроды коллектора ( $R_{Э1-R_{Э4}}, R_{колл} = 0$ ). Было выбрано азимутальное положение катодного блока, при котором достигается максимальное прохождение электронов в область рекуперации, где расположены электроды коллектора. В этом случае реализуется оптимальное положение секторов ВЭП, в которых отсутствуют электроны, по отношению к положению связей тороидального соленоида. Регулирование распределения продольного магнитного поля  $B_z(z)$  с помощью корректирующих катушек К1–К5 было выполнено с целью обеспечить максимальное прохождение частиц до последнего электрода Э4 с учетом того, что в спектре отработанного ВЭП присутствуют электроны с энергией в широком диапазоне. Измерения показали, что основная часть электронов достигает последнего четвертого электрода ( $I_{Э4} = (0,5–0,6) \cdot I_n$ ), однако имеется заметный ток на первый электрод  $I_{Э1}$  и на корпус  $I_{колл}$ . Для сравнения в расчетах примерно 95% тока пучка достигает четвертого электрода [13]. Важно при этом, что расстояние между границей пучка и ближайшим электродом может быть довольно малым. Можно предположить, что заметный ток на первый электрод и на корпус, зафиксированный в экспериментах, связан с нарушением соосности элементов электронно-оптической системы гиротрона. В первую очередь, по-видимому, это касается отклонения оси катодного блока относительно оси

магнитной системы. Наблюдаемое в экспериментах увеличение  $I_{колл}$  и уменьшение  $I_{Э1}$  с ростом напряжения  $U_0$  можно объяснить тем, что с ростом энергии электронов в среднем повышается радиус их траекторий в коллекторной области [13]. После проведенной оптимизации индукция продольной компоненты магнитного поля  $B_z$  в области рекуперации была равна примерно 0,03 Тл, а азимутальной компоненты  $B_\theta$  – примерно 0,044 Тл.

Дальнейшие измерения были выполнены при генерации выходной СВЧ-мощности в зоне возбуждения рабочей моды  $TE_{12,3}$ , включая режимы с высоким электронным КПД  $\eta_{эл}$  (более 40%), полученным в результате повышения качества ВЭП при оптимизированных распределениях электрического и магнитного полей в области формирования пучка [11, 12]. С ростом выходной мощности уменьшается в среднем энергия электронов в отработанном ВЭП, что приводило к увеличению тока  $I_{Э1}$  и к снижению тока  $I_{колл}$ .

При включенных сопротивлениях  $R_{E1}-R_{E4}$  с повышением тока пучка  $I_n$  происходило перераспределение токов на электроды коллектора. Соответствующие зависимости, которые были измерены при  $R_{колл} = 0$  и значении  $B_0$ , соответствующем максимуму выходной мощности, приведены на рис. 3. При токе  $I_n$ , равном  $\sim 4,3$  А, фиксировалось появление СВЧ-генерации, что сопровождалось увеличением  $I_{Э1}$  и падением  $I_{колл}$ . В дальнейшем с ростом тока  $I_n$  наблюдается возрастание токов  $I_{Э2}$  и  $I_{Э3}$  при снижении тока  $I_{Э4}$ . Данные результаты свидетельствуют о радиальном смещении электронов в сторону меньших радиусов и попадании их на электроды Э2 и Э3 по мере увеличения амплитуды электрического поля в коллекторе, которое происходит с ростом тока  $I_n$  при постоянных  $R_{Э1}-R_{Э4}$ .



**Рисунок 3.** Зависимости токов на электроды коллектора  $I_{Э1}-I_{Э4}$ ,  $I_{колл}$  от тока пучка  $I_n$  ( $U_0 = 30$  кВ,  $R_{Э1} = 0,82$  кОм,  $R_{Э2} = 0,80$  кОм,  $R_{Э3} = 1,26$  кОм,  $R_{Э4} = 8,45$  кОм,  $R_{колл} = 0$ ).

**Таблица 1.** Электрические параметры коллекторных электродов

Электрод	Сопротивление	Ток	Напряжение
Э1	$R_{Э1} = 0,82$ кОм	$I_{Э1} = 1,8$ А	$U_{Э1} = -8,0$ кВ
Э2	$R_{Э2} = 0,80$ кОм	$I_{Э2} = 1,4$ А	$U_{Э2} = -11,5$ кВ
Э3	$R_{Э3} = 1,26$ кОм	$I_{Э3} = 1,8$ А	$U_{Э3} = -15,2$ кВ
Э4	$R_{Э4} = 8,45$ кОм	$I_{Э4} = 1,4$ А	$U_{Э4} = -25,0$ кВ
корпус	$R_{колл} = 0,82$ кОм	$I_{колл} = 1,1$ А	$U_{колл} = -3,0$ кВ

Заключительные эксперименты были выполнены в режимах, когда на корпус коллектора подавалось дополнительное тормозящее напряжение. При  $U_0 = 30$  кВ,  $I_n = 7,7$  А,  $\eta_{эл} = 42\%$  максимальный полный КПД, равный  $\sim 72\%$ , был зафиксирован при значениях сопротивлений, приведенных в таблице 1. Здесь же указаны значения токов и напряжений на электродах коллектора. При  $R_{колл} \neq 0$  реализуется 5-ти ступенчатый

режим рекуперации. Для сравнения при  $R_{колл} = 0$  максимальный полный КПД был равен  $\sim 70\%$ .

## 5. Заключение

Моделирование и эксперименты, выполненные в гиротроне СПБПУ показали преимущества метода сепарации электронов ВЭП с разной энергией, основанного на дрейфе частиц в скрещенных продольном электрическом и азимутальном магнитном полях. Потенциал дальнейшего увеличения полного КПД гиротрона, очевидно, связан с улучшением соосности его элементов, что может обеспечить большее прохождение электронов в область рекуперации. Следовательно, можно полагать, что имеются возможности достижения в гиротроне СПБПУ высокого полного КПД (более 75%), приближающегося к значению, полученному в расчетах [13].

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

### Список литературы

1. Thumm M. K. A. et al. High-power gyrotrons for electron cyclotron heating and current drive //Nuclear Fusion. – 2019. – Т. 59. – №. 7. – С. 073001.
2. Sakamoto K. et al. Major improvement of gyrotron efficiency with beam energy recovery //Physical review letters. – 1994. – Т. 73. – №. 26. – С. 3532.
3. Glyavin M. Y. et al. Experimental investigation of a 110 GHz/1 MW gyrotron with the one-step depressed collector //International journal of infrared and millimeter waves. – 1997. – Т. 18. – С. 2129-2136.
4. Manuilov V. N. et al. Gyrotron collector systems: Types and capabilities //Infrared Physics & Technology. – 2018. – Т. 91. – С. 46-54.
5. Read M. E. et al. Depressed collectors for high-power gyrotrons //IEEE Transactions on Electron Devices. – 1990. – Т. 37. – №. 6. – С. 1579-1589.
6. Ling G., Piosczyk B., Thumm M. K. A new approach for a multistage depressed collector for gyrotrons //IEEE transactions on plasma science. – 2000. – Т. 28. – №. 3. – С. 606-613.
7. Ell B. F. et al. Toward the first continuous wave compatible multistage depressed collector design for high power gyrotrons //IEEE Transactions on Electron Devices. – 2023. – Т. 70. – №. 3. – С. 1299-1305.
8. Лукша О. И., Трофимов П. А. Метод сепарации электронов для систем многоступенчатой рекуперации в гиротронах //Письма в Журнал технической физики. – 2015. – Т. 41. – №. 18. – С. 38-45.
9. Лукша О. И., Трофимов П. А. Высокоэффективный гиротрон с многоступенчатой рекуперацией остаточной энергии электронов //Журнал технической физики. – 2019. – Т. 89. – №. 12. – С. 1988-1996.
10. Лукша О.И и др. Траекторный анализ в коллекторе с многоступенчатой рекуперацией энергии для прототипа гиротрона ДЕМО. Ч. III. Влияние параметров отработанного электронного потока //Журнал технической физики. – 2023. – Т. 93. – №.5. – С. 718-723.
11. Louksha O. I. et al. On potentials of gyrotron efficiency enhancement: measurements and simulations on a 4-mm gyrotron //IEEE transactions on plasma science. – 2006. – Т. 34. – №. 3. – С. 502-511.
12. Лукша О. И. и др. Динамические процессы в винтовых электронных потоках гиротронов //Журнал технической физики. – 2013. – Т. 83. – №. 5. – С. 132-140.
13. Louksha Oleg I., Trofimov Pavel A., Malkin Alexander G. Enhancement of the 4-mm wavelength gyrotron efficiency by multistage energy recovery //St. Petersburg Polytechnic University Journal. Physics and Mathematics. – 2023. – Т. 70. – №. 4. – С. 118-133.