

# Проблемы гиротронных комплексов для УТС

**В.Е. Запевалов**

Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова РАН

**Аннотация:** обсуждаются проблемы гиротронных комплексов для установок УТС, анализируются причины, ограничивающие надежность и срок службы гиротронов, а также снижения их КПД и мощность в процессе долговременной работы. Описаны варианты диагностики и конструктивных решений, способствующие повышению надежности и срока службы гиротронов. Обсуждаются проблемы электромагнитной совместимости и защиты персонала при работе гиротронных комплексов.

**Ключевые слова:** УТС, гиротрон, плазма, токамак, стелларатор, электронные пучки, ЭЦР

## 1. Введение

В современных установках управляемого термоядерного синтеза (УТС) в настоящее время используются мощные гиротроны для электронно-циклотронного нагрева (ECRH), управления током (ECCD) и стабилизации плазмы, а также очистки стенок камеры [1-5]. Некоторые примеры комплексов приведены в таблицу 1.

**Таблица 1.** Примеры гиротронных комплексов

Установка	Число гиротронов	Частота, ГГц	Мощность, МВт	Страна
D-III-D	6	110, 117	1, 1,2	США
ASDEX-Upgrade	8	140, 105	1	ФРГ
T-15МД	8	82,6, 115	1	Россия
W7-X	10 (12)	140	1, (1,5)	ФРГ
ITER	24 (50 и более)	170	1 (1.2)	Франция
TPT	12	230	1	Россия
DEMO-J	100 (и более)	Более 200	1	Япония

Большое число мощных функционирующих приборов повышает остроту проблемы обеспечения совместной работы, надежности и долговечности гиротронов. Высокий уровень энергетических нагрузок в резонаторе, выходном окне и при осаждении отработанного электронного пучка на коллекторе остается серьезной проблемой. Использование пространственно-развитых рабочих мод и интенсивного охлаждения - современный ответ на проблему резонатора. Применением диска из синтетического алмаза с охлаждением по периметру обеспечивает повышение пропускной способности выходного окна. Самая массивная и трудоемкая подсистема мощных гиротронов - коллектор остается одной из критических частей. Для увеличения площади токооседания в большинстве мощных гиротронов используются коллекторы с продольным сканированием электронного пучка [1, 2]. При использовании рекуперации энергии отработанного пучка (CPD – collector potential depression) [1, 2, 4-6], - помимо заметного увеличения КПД, значительно снижается мощность, рассеиваемая на коллекторе.

Ниже обсуждаются достижения в построении гиротронных комплексов, насущные проблемы и возможные решения. Основное внимание уделяется системам, близким к запуску или уже работающих в настоящее время.

## 2. Состав гиротронного комплекса

В состав комплекса входят гиротроны одного или нескольких типов, с мощностью

порядка 1 МВт, частотами 80-170 ГГц. Каждый из них (См. рис. 1) снабжен криомагнитом, создающим необходимое для работы магнитное поле. Также имеются системы: высоковольтных модуляторов, защиты гиротронов, охлаждения (поток на коллекторе порядка 1000 л/мин), подогрева катода, пилообразного во времени магнитного поля коллекторной катушки для сканирования электронного пучка по коллектору, согласования гиротрона с линией передачи (MOU- matching optics unit), передающих линий и ввода микроволнового излучения в установку УТС (токамак, стелларатор, открытая ловушка), автоматизированного управления комплексом. В настоящее время используются волноводные и квазиоптические передающие линии протяженностью несколько десятков метров. В перспективных комплексах планируются вакуумные линии на основе гофрированных волноводов с отдельными квазиоптическими элементами.

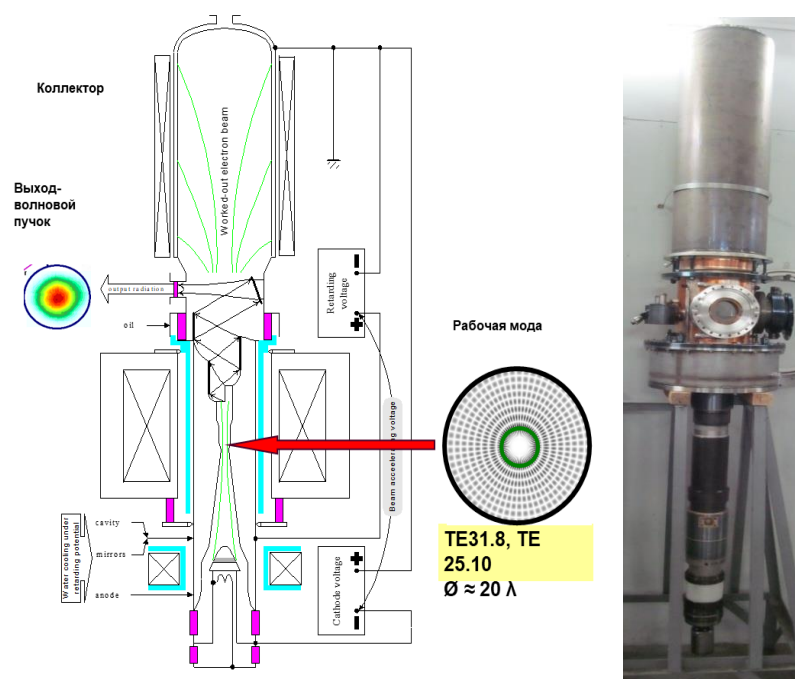


Рисунок 1. Схема и фотография мощного гиротрона

### 3. Надежность и долговечность гиротрона

Рабочий цикл гиротрона включает его проектирование, изготовление, откачку (отпайку), тренировку до получения проектных режимов, транспортировку, установку в криомагнит и юстировку, тренировку на рабочей установке, рабочий цикл, реставрация после повреждений, завершение рабочего цикла и утилизацию. Для отпайки гиротрона требуются крупномасштабное вакуумное оборудование, которым располагают лишь немного предприятий во всем мире. Еще сложнее ситуация с тренировкой гиротронов. Для тренировки мегаваттного гиротрона в полномасштабном режиме требуются испытательные стенды, источники высоковольтного питания с мощностью более 2-х мегаватт, система охлаждения с потоком воды более  $1 \text{ м}^3$  в минуту. Некоторые производители гиротронов не располагают полномасштабным испытательным комплексом и производят только начальную фазу испытаний и тренировки гиротрона, а завершение идет уже на установке заказчика. В последнее время построены испытательные стенды высокой мощности в КИТ (Карлсруэ), в Лозанне (Швейцария), на стеллараторе W7-X, (см. рис.2), для разработки и испытаний гиротронов Thales (Франция) Отметим, что прогнозируемый срок службы основных подсистем гиротронов (катода, резонатора и коллектора) составляет порядка 10 тыс. часов, Возмущающие факторы при работе

комплекса вносят заметные коррективы в сторону уменьшения. Это делает необходимым оценку указанных факторов, а также проведение диагностики гиротронов, для обеспечения их надежной работы и своевременной реставрации.

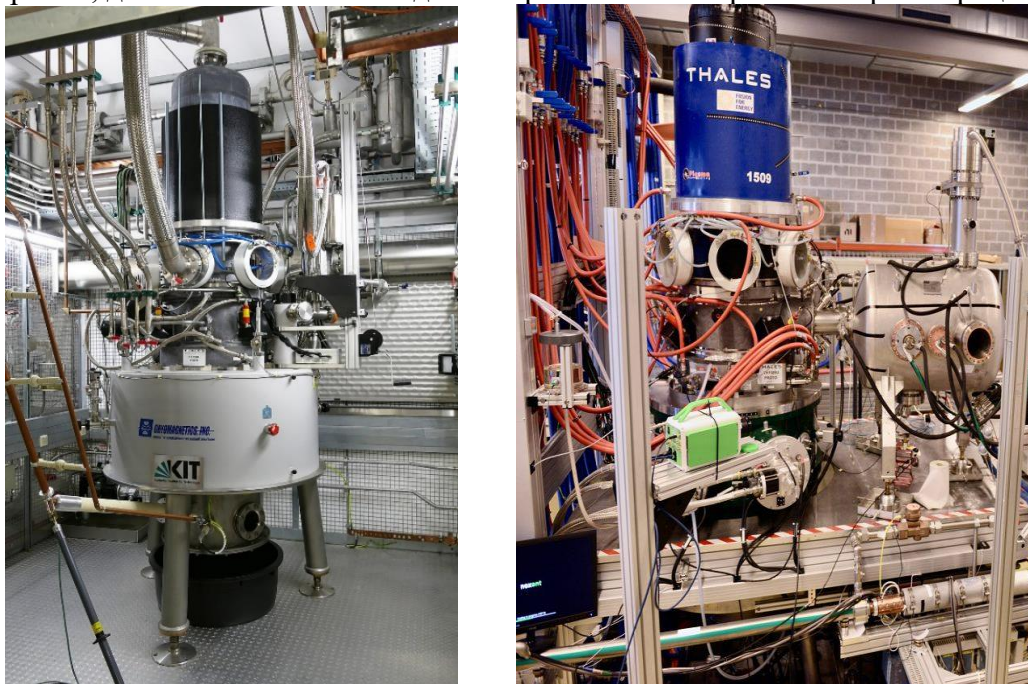


Рисунок 2. Испытательные стенды гиротронов в Грайфсвальде и в Лозанне.

#### 4. Изменение параметров при длительной работе гиротронов.

Основными режимами работы мощных гиротронов в ЭЦР комплексах на установках УТС является импульсный, с частотой повторения 1-5 кГц со скважностью около 2, и непрерывный. В процессе длительной работы выходная мощность и КПД в стационарном режиме, как правило снижаются. Рассмотрим возможные причины этого явления. КПД и выходная мощность гиротрона определяется возможностями его электронно-оптической системы, резонатора, системы преобразования и вывода излучения, коллектора (в т.ч. и с рекуперацией). Ограничения, обусловленные пропускной способностью выходного окна, потерями рассеянного излучения во встроенном преобразователе и энерговыделением на коллекторе слабо зависят от времени. Рассмотрим ограничения КПД и выходной мощности гиротрона, обусловленные реальными свойствами винтового электронного пучка (ВЭП) и процессами в резонаторе. Мощность и КПД гиротрона, а также мощность на коллекторе можно записать в виде [7]

$$P_{\text{вых}} = \eta I U, \quad (1)$$

$$\eta = t_{\perp} \eta_{\perp} \eta_c Q_{\text{ohm}} / (Q_{\text{ohm}} + Q_d), \quad (2)$$

$$P_{\text{coll}} = (1 - t_{\perp} \eta_{\perp}) I (U - U_{\text{ret}}), \quad (3)$$

где  $I$  и  $U$  - ток и ускоряющее напряжение,  $U_{\text{ret}}$  - тормозящее напряжение рекуперации,  $\eta_{\perp}$  и  $\eta_c$  поперечный КПД и эффективность встроенного преобразователя и системы вывода,  $t_{\perp}$  - отношение осцилляторной энергии электронов к полной,  $Q_d$  и  $Q_{\text{ohm}}$  - дифракционная и омическая добротности. Величины  $I$  и  $t_{\perp}$  - определяются системами формирования и транспортировки винтового электронного пучка (ВЭП). Процесс термоэлектронной эмиссии носит характер пятнистости [8], особенно при работе в режиме температурного ограничения,

характерного для магнетронно-инжекторных пушек гиротронов. В процессе работы эмиссионная неоднородность усиливается, эффективная плотность тока нарастает, питч-фактор  $g = v_{\perp} / v_z$  и  $t_{\perp} = g^2 / (1 + g^2)$  снижаются, а скоростной разброс растет. Указанный разброс определяет максимум питч-фактора и, по существу, эффективность электронной пушки [7]. Кроме того, разброс воздействует и непосредственно на эффективность взаимодействия. Для гиротронов мегаваттного уровня мощности, влияние  $\delta v_{\perp}$  на КПД может быть аппроксимирована формулой

$$\eta = \eta_{\max} \cdot [1 - 0.4 \cdot (\delta v_{\perp})^2]. \quad (4)$$

При снижении КПД, согласно (3) увеличивается мощность, рассеиваемая на коллекторе, с соответственно снижается срок его службы. В свете вышеуказанных обстоятельств влияние свойств электронного пучка на выходные характеристики гиротрона и их изменение в процессе длительной работы привлекают все большее влияние разработчиков. Создаются новые и улучшаются методы диагностики как эмиттеров катодов МИП, так и гиротронов в целом: анализ вольт амперных характеристик, калориметрирование отдельных подсистем, рентгеновская диагностика [9] и т. д.

КПД и мощность гиротрона в стационарном режиме в значительной мере определяются сценарием включения, который имеет несколько стадий:

1. Подъем анодного и ускоряющего напряжений – сильное влияние на ВАХ режимов пространственного заряда и температурного ограничения, провисание потенциала, возбуждение последовательности мод. [7]
2. Процессы ионной нейтрализации пространственного заряда, снижение провисания потенциала, понижение гирочастоты.
3. Тепловые деформации резонатора, изменение его частоты.
4. Подстройка параметров гиротрона для оптимизации эффективности (магнитное поле, подогреватель, напряжения и т.д.) [4, 7].

Оптимизация конструкции гиротрона и сценария включения позволила существенно снизить изменение частоты во время импульса (рис. 3.) и обеспечить высокую воспроизводимость мощности от импульса к импульсу. Влияние долговременных процессов на динамику переходных процессов находится в начальной стадии изучения.

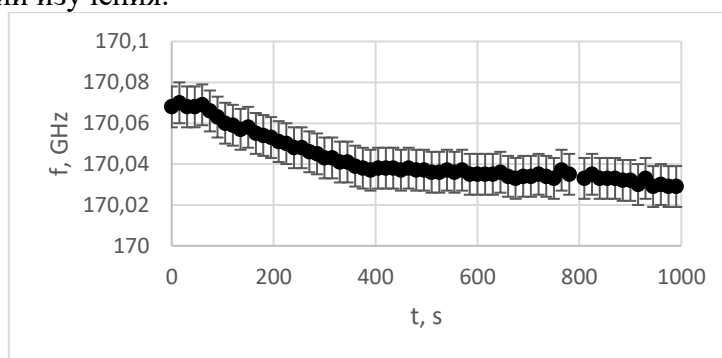


Рисунок 3. Дрейф частоты во время 1000 с импульса.

## 5. Проблема электромагнитной совместимости и защита персонала

При работе мощных гиротронов и сторонних устройств формируются электромагнитные поля, как необходимые для их работы, так и мешающие нормальному функционированию комплексов [10, 11]. Большое разнообразие электромагнитных полей делает актуальными проблемы электромагнитной совместимости и обеспечения безопасной работы персонала. Паразитные колебания

могут иметь мощность киловаттного уровня и воздействовать на электронное оборудование. Например, паразитные колебания типа с частотами порядка 100 МГц могут появиться после пробоя или длительной работы, имеют частоты в диапазонах телевизионных диапазонов, радиолокационного и навигационного оборудования. Персонал, в соответствии с санитарными нормами, должен быть надежно защищен от электромагнитных полей от инфразвукового до рентгеновского диапазона [9], как в процессе сервисных работ, так и при нештатных ситуациях.

## 5. Заключение

Таким образом, как для уже работающих, так и проектируемые варианты больших гиротронных комплексов требуются повышение мощности отдельных гиротронов, надежности и срока их службы и, что с учетом накопленного опыта, будет способствовать успешной реализации ЭЦ систем для УТС. Рассмотренные технические решения могут представлять очевидный интерес и для других систем с использованием гиротронов.

Работа выполнена в рамках проекта **ИПФ РАН FFUF-2022-0007**.

### Список литературы.

1. Litvak A.G., Denisov G.G., Tai E.M., et al. Development in Russia of high-power gyrotrons for fusion. // Nuclear Fusion, 48, №5, 2008, 5 pp.1-5. DOI:[10.1088/0029-5515/48/5/054007](https://doi.org/10.1088/0029-5515/48/5/054007)
2. Litvak AG, Denisov G.G., Myasnikov V.E., et al., Development in Russia of megawatt power gyrotrons for fusion, // J. Infrared Millim. Terahertz Waves 32 (3) (2011), P. 337-342, DOI: [10.1007/s10762-010-9743-8](https://doi.org/10.1007/s10762-010-9743-8).
3. AlikaeV V.V., Bagdasarov A.A., Borshegovskij A.A., at al. Electron cyclotron current drive experiments on T-10. Nuclear Fusion 32 1992, 1811-1821. DOI:[10.1088/0029-5515/32/10/I09](https://doi.org/10.1088/0029-5515/32/10/I09)
4. M. K. A. Thumm, G. G. Denisov, K. Sakamoto, and M. Q. Tran, Highpower gyrotrons for electron cyclotron heating and current drive, Nucl. Fusion, vol. 59, no. 7, Jul. 2019, Art. no. 073001, doi: [10.1088/1741-4326/ab2005](https://doi.org/10.1088/1741-4326/ab2005).
5. M. Thumm, "State-of-the-art of high-power gyro-devices and free electron masers," J. Infr., Millim., THz Waves, vol. 41, no. 1, pp. 1–140, Jan. 2020, doi: [10.1007/s10762-019-00631-y](https://doi.org/10.1007/s10762-019-00631-y).
6. K. Sakamoto et al., "Major improvement of gyrotron efficiency with beam energy recovery," Phys. Rev. Lett., vol. 73, no. 26, pp. 3532–3535, Dec. 1994, doi: [10.1103/PhysRevLett.73.3532](https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.73.3532).
7. G. Nusinovich, Introduction to the Physics of Gyrotrons. Baltimore, MD, USA: Johns Hopkins Univ. Press, 2004.
8. Никитин Н.Е., Шешин Е.П. Физические основы эмиссионной электроники-Долгопрудный, Изд. дом «Интеллект», 2018. -576 с.
9. Саврухин П.В., Шестаков Е.А., Тепикин В.И., и др. Рентгеновское излучение гиротрона с частотой 82,6 ГГц на токамаке Т-15МД. Изв. Вузов, Радиофизика, Т. 67, №9, 2024, с. 774-783. DOI: [10.52452/00213462\\_2024\\_67\\_09\\_774](https://doi.org/10.52452/00213462_2024_67_09_774)
10. Запевалов В. Е Проблемы больших гиротронных комплексов. Международная конференция "СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии", Севастополь, 2025, с. 196-197
11. Запевалов В. Е Проблемы больших гиротронных комплексов. XXI Всероссийская конференция «Диагностика высокотемпературной плазмы», Программа и СБОРНИК ТЕЗИСОВ ДОКЛАДОВ, 29 сентября – 03 октября 2025г., г. Сочи, Подготовлено к изданию в «ИТЭР-Центр», 123060, г. Москва, ул. Расплетина д.11 к.2, 2025, с. 452-455.