

УДК 533.9.07

## Новый гиротронный комплекс МИГ-3 для создания и нагрева плазмы в стеллараторе Л-2М и результаты первых экспериментов

Г. М. Батанов, В. И. Белоусов, Ю. Ф. Бондарь, В. Д. Борзосеков, Д. Г. Васильков, С. Е. Гребенщиков, И. А. Иванников, Л. В. Колик, Е. М. Кончечков, Д. В. Малахов, Н. В. Матвеев, А. И. Мещеряков, А. Е. Петров, К. А. Сарксян, Н. Н. Скворцова, В. Д. Степахин, Н. К. Харчев, Ю. В. Хольнов, Е. М. Тай

*Представлены характеристики нового гиротронного комплекса МИГ-3 для создания и нагрева плазмы в стеллараторе Л-2М и результаты первых экспериментов с использованием указанного комплекса. Комплекс МИГ-3 включает в себя два трехэлектродных гиротрона (ГИКОМ) нового поколения с рекуперацией энергии электронного пучка, высоковольтный модулятор, обеспечивающий работу обоих гиротронов как в отдельности, так и совместно, а также блок управления и регистрации данных. При одновременной работе обоих гиротронов суммарная удельная мощность, вводимая в плазму, может достигать 5 МВт/м<sup>3</sup>.*

PACS: 52.50 Sw, 52.55 Hc

*Ключевые слова:* гиротрон, плазма, стелларатор, нагрев, модулятор, блок управления.

### Введение

Процессы аномального переноса и нагрева в высокотемпературной плазме в токамаках и стел-

лараторах во многом объясняется развитием различного рода микротурбулентностей [1—4]. В связи с этим при электронно-циклотронном резонансном нагреве (ЭЦ-нагрев) важным является вопрос о взаимосвязи микроволнового излучения, нагревающего плазменный шнур, и характеристиками турбулентности.

Ранее в экспериментах на стеллараторе Л-2М с различными мощностями ЭЦ-нагрева (100 и 200 кВт) было обнаружено, что уровень коротковолновой турбулентности существенно влияет на перенос и, соответственно, на энергетическое время удержания плазмы [5], в отличие от длинноволновой турбулентности [6].

Для изучения функциональной зависимости взаимосвязи микро- и макропараметров плазмы в Л-2М необходимо значительно расширить диапазон значений мощности микроволнового излучения, вводимого в плазму, по сравнению с прежними экспериментами. Увеличение вводимой мощности нагрева необходимо, во-первых, для получения надежных результатов о функциональных зависимостях мощности нагрева и удержания плазмы (энергетического времени удержания  $\tau_E$ , энергосодержания плазмы  $W_E$ ) и сравнения их с современными скейлингами [7], во-вторых, для изучения микро- и макропараметров при достижении критических режимов (максимального давления  $\beta$ , L-N перехода, появления краевых и внутренних барьеров). Ранее мощность микроволнового излучения, создаваемая в гиротронном комплексе МИГ-2 для ЭЦ-нагрева плазмы стелларатора Л-2М, была ограничена и не позволяла решать поставленные задачи. Кроме того, режим работы комплекса МИГ-2 позволял исследовать только

**Батанов Герман Михайлович**, заведующий лабораторией.  
**Бондарь Юрий Федорович**, ведущий конструктор.  
**Борзосеков Валентин Дмитриевич**, младший научный сотрудник.  
**Васильков Дмитрий Григорьевич**, научный сотрудник.  
**Гребенщиков Станислав Евгеньевич**, заведующий лабораторией.  
**Колик Леонид Викторович**, научный сотрудник.  
**Кончечков Евгений Михайлович**, младший научный сотрудник.  
**Малахов Дмитрий Валерьевич**, научный сотрудник.  
**Мещеряков Алексей Иванович**, научный сотрудник.  
**Петров Александр Евгеньевич**, научный сотрудник.  
**Сарксян Карен Агасевич**, ведущий научный сотрудник.  
**Скворцова Нина Николаевна**, ведущий научный сотрудник.  
**Степахин Владимир Дмитриевич**, младший научный сотрудник.  
**Харчев Николай Константинович**, старший научный сотрудник.  
**Хольнов Юрий Викторович**, старший научный сотрудник.  
 Институт общей физики им. А. М. Прохорова РАН.  
 Россия, 119991, Москва, ул. Вавилова, 38.  
 E-mail: batanov@fpl.gpi.ru  
**Белоусов Владимир Иванович**, научный сотрудник.  
 Институт прикладной физики РАН.  
 Россия, 603950, Нижний Новгород, ул. Ульянова, 46.  
**Тай Евгений Максевич**, директор.  
 ЗАО "НПП ГИКОМ-НН".  
 Россия, 603107, Нижний Новгород, ул. Ларина, 7  
**Иванников Игорь Анатольевич**, начальник отдела.  
**Матвеев Николай Викторович**, начальник отделения.  
 ВНИЦ ВЭИ им. В. И. Ленина.  
 Россия, 143502, Московская обл., г. Истра, ул. Заводская, 5.

*Статья поступила в редакцию 15 июля 2012 г.*

© Батанов Г. М., Белоусов В. И., Бондарь Ю. Ф., Борзосеков В. Д., Васильков Д. Г., Гребенщиков С. Е., Иванников И. А., Колик Л. В., Кончечков Е. М., Малахов Д. В., Матвеев Н. В., Мещеряков А. И., Петров А. Е., Сарксян К. А., Скворцова Н. Н., Степахин В. Д., Харчев Н. К., Хольнов Ю. В., Тай Е. М., 2012

центральный нагрев плазменного шнура и не обеспечивал режима периферийного нагрева.

Для решения описанных выше задач по исследованию плазмы в стеллараторе Л-2М был разработан и создан новый гиротронный комплекс ЭЦ-нагрева плазмы МИГ-3. Механизм электронно-циклотронного нагрева плазмы комплекса МИГ-3 необыкновенной волной на второй гармонике гирочастоты электронов соответствует традиционному для бестокового стелларатора Л-2М механизму создания и нагрева плазмы [8, 9].

В настоящей работе представлено описание нового комплекса МИГ-3 для ЭЦ-нагрева плазмы в стеллараторе Л-2М, а также описание результатов первых экспериментов (для микро- и макропараметров плазмы) с использованием данного комплекса при значительном, по сравнению с комплексом МИГ-2, увеличении мощности микроволнового нагрева. При работе двух гиротронов комплекса МИГ-3 ожидается достижение максимального удельного энерговыклада в плазму Л-2М до  $5 \text{ МВт/м}^3$ .

### Характеристики комплекса МИГ-3

Комплекс МИГ-3 состоит из следующих основных блоков.

*Гиротронный блок* состоит из двух трехэлектродных гиротронов с рекуперацией энергии электронного пучка (производитель ГИКОМ, Н. Новгород), помещенных в криомагниты. Гиротрон "Борец 75/0,8" генерирует микроволновое излучение на фиксированной частоте 75,1 ГГц с мощностью до 700 кВт, многочастотный гиротрон "Борец 72/2" генерирует излучение на трех частотах 71,5, 74,8 и 78,2 ГГц с мощностью до 700 кВт.

*Блок высоковольтного модулятора с емкостным накопителем* разработан специально и позволяет независимо включать оба гиротрона в импульсном режиме. Длительность микроволнового импульса при работе одного гиротрона до 20 мс, при работе двух гиротронов — до 15 мс.

*Блок транспортировки и ввода* в два боковых патрубка вакуумной камеры стелларатора микроволнового излучения от гиротронов состоит из двух квазиоптических зеркальных трактов. Каждый из трактов позволяет ввести в камеру гауссовы пучки с необыкновенной поляризацией электрического поля (Х-волна), что обеспечивает высокую эффективность поглощения СВЧ-мощности в плазме на резонансе на второй гармонике гирочастоты электрона. Частью трактов являются поворотные зеркала для измерения высоких уровней мощности поточным калориметром.

*Блок управления и регистрации*, включающий в себя систему автоматизированного управления гиротронным комплексом, а также систему реги-

страции, хранения и обработки параметров всех блоков комплекса.

Далее приведены более подробные характеристики указанных блоков.

### Гиротронный блок

В комплексе МИГ-3 использованы два гиротрона нового поколения (изготовитель ГИКОМ) триодного типа с рекуперацией энергии электронного пучка [10]. Мощность гиротрона "Борец 75/0,8" с фиксированной частотой 75,1 ГГц во время приемосдаточных испытаний достигла 0,85 МВт в тестовых импульсах СВЧ длительностью 100 мс. 98 % излучаемой СВЧ-мощности выводится в виде квазигауссовой моды. Мощность второго гиротрона "Борец 75/2", который может обеспечивать работу на трех рабочих частотах, в тестовых измерениях достигла 0,8 МВт на центральной частоте 74,8 ГГц и не менее 0,7 МВт на двух дополнительных частотах 71,5 и 78,2 ГГц [11]. Система рекуперации энергии реализует процесс, при котором электроны после выхода из рабочего пространства тормозятся электрическим полем вблизи коллектора, имеющего потенциал ниже начального потенциала пучка, и отдают в источники питания часть своей кинетической энергии, не израсходованной при взаимодействии с ВЧ-полем. Это позволило в режиме одноступенчатой рекуперации достигнуть КПД не менее 50 % для каждого гиротрона.

Конструкция гиротронов включает использование магнетронно-инжекторной диодной пушки с гексаборид-лантановым катодом кермет-типа, обеспечивающим долговечность работы при рабочих плотностях тока не менее 2000 ч с включенным накалом. Гиротроны имеют сверхразмерные резонаторы, обеспечивающие необходимую селекцию мод, встроенные преобразователи рабочих мод резонатора в волновой пучок с радиальным выводом СВЧ-мощности через борнитовое окно. Для многочастотного гиротрона была разработана специальная конструкция нерезонансного вывода энергии, основанного на эффекте Брюстера, которая обеспечивает минимальные потери для каждой рабочей частоты генерации. Преобразование рабочих мод резонатора многочастотного гиротрона в гауссов пучок происходит в специальном гофрированном волноводе, расположенном между резонатором и излучателем, что позволяет получить чистоту моды на выходе гиротрона не ниже 95 %. Для осаждения отработавшего электронного пучка применяются толстостенные коллекторы, профилированные в целях достижения однородной плотности мощности. Максимальная плотность мощности на коллекторе не превышает  $2,3 \text{ кВт/см}^2$  в случае прохождения импульса без

генерации СВЧ-мощности. При этом максимальная температура на внутренней стенке коллектора в конце импульса длительностью 100 мс достигает 250 °С.

Каждый гиротрон установлен в криостат с диаметром теплого отверстия 150 мм. Рабочее магнитное поле для таких гиротронов составляет около 2,6 Тл и при заданной рабочей длительности импульса требует использования сверхпроводящих катушек. Для питания сверхпроводящих катушек используются специально разработанные системы электропитания. Каждая такая система содержит прецизионный программируемый блок питания, блок аварийного выключения магнитного поля и "медленной" защиты, блок "быстрой" защиты системы электропитания. В качестве блоков питания применяются прецизионные источники тока Genesys GEN6-100 фирмы TDK-Lambda. Блоки питания соединены с управляющим компьютером в промышленную слаботочную сеть посредством протокола RS485. Физическое подключение блоков питания в промышленную сеть осуществляется через полнодуплексный преобразователь электрических сигналов RS485 протокола в одно-модовое оптоволокно и обратно. Такая гальваническая развязка является необходимым условием для надежной защиты управляющих компонентов гиротронного комплекса в целом от различных высоковольтных пробоев, которые могут возникать в аварийных ситуациях. Управление системой электропитания криомагнитов осуществляется с помощью специализированного программного обеспечения, разработанного сотрудниками ИОФ РАН. Данное программное обеспечение позволяет производить "мягкий" старт и спуск магнитного

поля за штатное время 40 мин, а также ведет автоматический протокол работы системы электропитания криомагнитов. Блок аварийного выключения производит "быстрый" спуск магнитного поля, примерно, за 15 мин. Такой режим работы для магнитной катушки крайне нежелателен, так как возникающие механические напряжения могут вывести криомагнит из строя, но необходим на случай аварийных ситуаций. В данном блоке применяется группа силовых диодов HFA320NJ40C с принудительным охлаждением. Блок "быстрой" защиты содержит быстродействующие силовые диоды и предназначен в первую очередь для защиты прецизионного источника тока от рекуперации энергии из высокоиндуктивной сверхпроводящей катушки обратно в источник.

### Блок высоковольтного модулятора с емкостным накопителем

В состав системы ЭЦ-нагрева плазмы входят два трехэлектродных гиротрона с рекуперацией. Для их возбуждения на катод гиротрона должно быть подано отрицательное (55—60 кВ / 25 А), а на анод — положительное (до 35 кВ / 0,2 А) напряжение относительно заземленного коллектора гиротрона. Так реализуются высокие значения суммарного поля, ускоряющего электронный пучок в гиротроне (до 90 кВ и выше), при умеренных затратах мощности на его прохождение, т. е. обеспечивается высокий КПД СВЧ-генератора.

Функциональная схема системы электропитания гиротронов стелларатора Л-2М приведена на рис. 1.

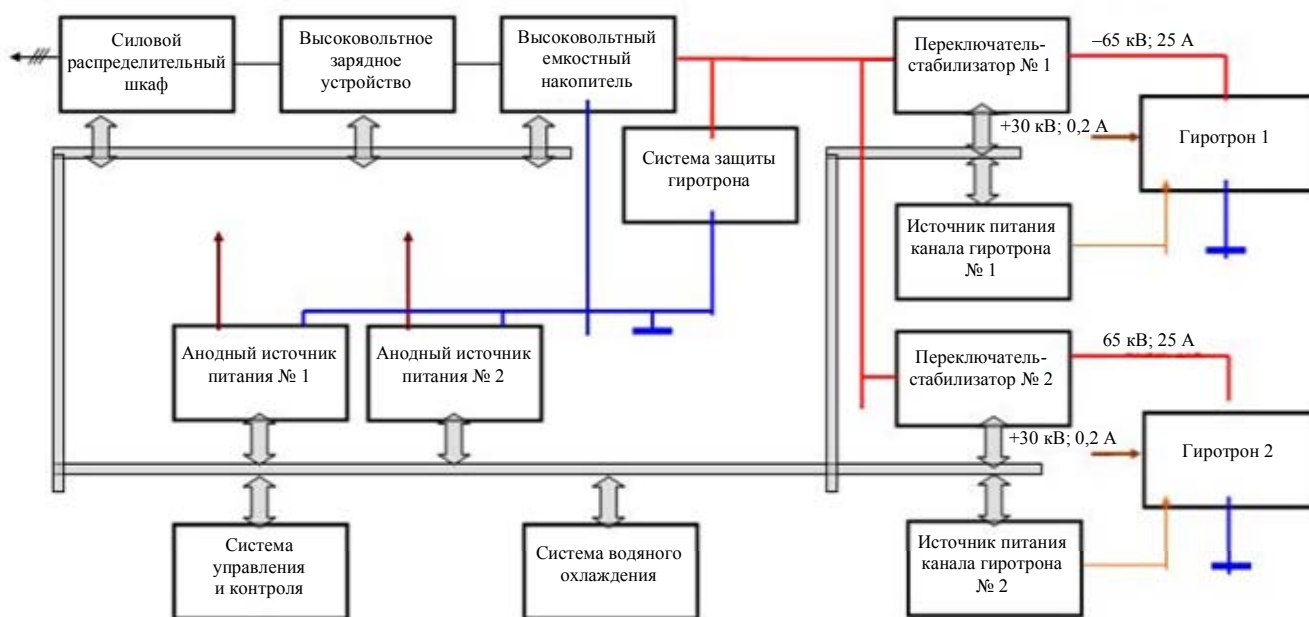


Рис. 1. Функциональная схема системы электропитания гиротронного комплекса МИГ-3

Принципиальной особенностью системы является использование единого емкостного накопителя энергии для одновременной, но независимой работы двух гиротронных каналов. При этом в каждом из каналов могут использоваться как трехэлектродные гиротроны с рекуперацией, так и двухэлектродные диодные гиротроны. Эта возможность обеспечивается подключением гиротронов к общему емкостному накопителю с помощью независимых электронных переключателей, выполненных на мощных электровакуумных триодах и работающих в режиме высоковольтных переключателей-стабилизаторов. Каждая лампа обеспечивает в пределах допустимого для регулирования запаса напряжения на аноде (до 15 кВ) поддержание на заданном уровне напряжения на нагрузке, т. е. катоды соответствующего гиротрона с точностью не хуже 1 % при времени переключения из запертого состояния порядка десятков—сотен микросекунд и отключении менее, чем за 10 мкс.

При работе с трехэлектродными гиротронами, даже при переходе электронных переключателей-стабилизаторов в ключевой режим в процессе снижения напряжения на емкостном накопителе, стабилизация суммарного ускоряющего напряжения гиротрона продолжает осуществляться по каналу управления анодным модулятором. Величина начального выходного напряжения модуляторов задается независимо с пульта дистанционного управления, а его изменение во время формирования импульса компенсирует спад напряжения на емкостном накопителе. В результате, на каждом из трехэлектродных гиротронов может быть установлено раздельно заданное ускоряющее напряжение.

Электронные переключатели на мощных триодах допускают параллельную работу на общую нагрузку без принятия каких-либо специальных мер по выравниванию тока между триодами. Это дополнительно расширяет функциональные возможности системы электропитания, обеспечивая работу с двукратной токовой нагрузкой, например, при работе с более мощными гиротронами.

Основным элементом переключателя-стабилизатора является мощный триод "Тонус 2/100", обеспечивающий импульсный ток в микросекундном диапазоне до 300 А при напряжении на сетке до 5 кВ. При формировании длинных, порядка 100 мс, импульсов значение максимально допустимого анодного тока снижается до 30—50 А. Минимальное падение напряжения на приборе в этом режиме составляет 5—7 кВ при напряжении управления до +1,5 кВ. Напряжение запирающего триода при  $U_a = 80$  кВ не превышает 100 В.

В состав источника анода гиротрона входят первичный регулятор, последовательный резонансный высокочастотный преобразователь напряжения, высокочастотный высоковольтный многосекционный трансформатор и полупроводниковый формирователь импульсов.

Формирователь импульсов выполнен на базе мощных FET-транзисторов. Модуль состоит из 50 ячеек, причем выпрямленное напряжение на входе каждой из них регулируется в пределах до 700 В. При включении проходных транзисторов всех ячеек обеспечивается суммарное напряжение на выходе источника питания до 35 кВ. После окончания импульса включаются шунтирующие транзисторы, обеспечивая быстрый разряд паразитной емкости нагрузки.

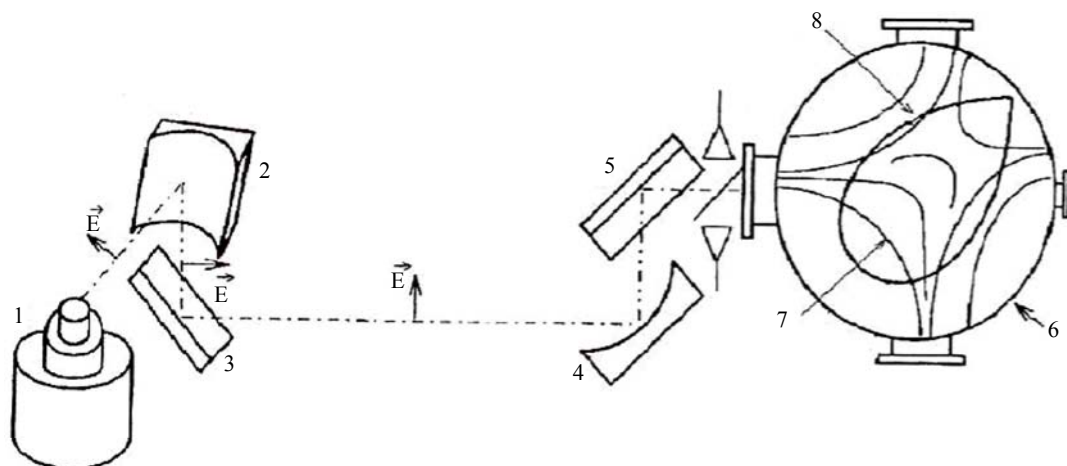
Охлаждение гиротронов и модуляторных ламп осуществляется двумя замкнутыми независимыми автономными подсистемами. Каждая подсистема включает чиллер ВТХ0-12 фирмы "Вактек-Холод" с холодопроизводительностью не хуже 14 кВт и два контура охлаждения. Один контур охлаждения предназначен для охлаждения анода гиротрона, второй — для охлаждения модуляторной лампы. В качестве теплоносителя используется дистиллированная вода. Охлаждение катода гиротрона осуществляется посредством проточной воды, забираемой из системы водоснабжения установки Л-2М.

### **Блок транспортировки и ввода микроволнового излучения**

Существует сложная задача о вводе СВЧ-излучения гиротронов большой мощности (сотни кВт) в плазму тороидальной установки. На выходе современных гиротронов излучение в виде квазигавусовых пучков проводится на большие расстояния (в десятки метров) с минимальными потерями при помощи квазиоптических трактов.

На стеллараторе Л-2М тоже используются зеркальные квазиоптические тракты. Для одночастотного гиротрона "Борец 75/0,8" был адаптирован (модифицирован) четырехзеркальный квазиоптический тракт от комплекса МИГ-2 [12].

На рис. 2 представлен вид квазиоптического тракта для одночастотного гиротрона. Общая длина тракта составляет около 4 м. Первые два зеркала около гиротрона используются для сжатия пучка и поворота поляризации пучка из горизонтальной в вертикальную. Использование тракта позволяет вводить в камеру стелларатора необыкновенную электронно-циклотронную волну (Х-волну).

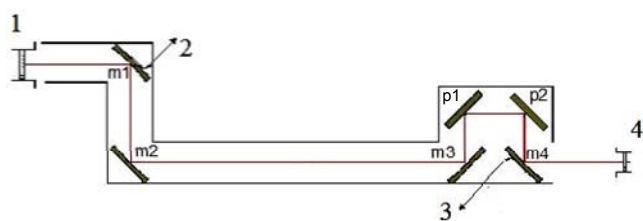


**Рис. 2. Схема квазиоптического тракта, рассчитанного для ввода излучения 75 ГГц гиротрона комплекса МИГ-3 в камеру стелларатора:**

1 — гиротрон; 2—5 — зеркала тракта; 6 — камера стелларатора; 7 — линии постоянного магнитного поля  $|B| = \text{const}$ ; 8 — граница плазмы

На квазиоптическом тракте для одночастотного гиротрона для измерения проходящего и отраженного сигналов используются квазиоптические ответвители, как и в экспериментах с комплексом МИГ-2 [13].

Для многочастотного гиротрона "Борец 75/2" был разработан и создан в ИПФРАН квазиоптический тракт. В состав линии передачи СВЧ-излучения многочастотного гиротрона (рис. 3) входят: квадратичные корректоры — зеркала  $m1-m4$ ; поляризатор — зеркала  $p1, p2$ ; направленные ответвители (на рис. 3 отмечены 1 и 2) для регистрации прямой и отраженной мощностей (установлены на зеркалах  $m1, m4$ ). Расчетные потери (дифракционные и омические) в тракте не превышают 5 %.



**Рис. 3. Схема квазиоптического тракта многочастотного гиротрона:**

1 — окно гиротрона; 2 — к детектору проходящей мощности; 3 — к детектору отраженной мощности; 4 — окно стелларатора Л-2М

Траектория волнового пучка тракта (центральный луч показан на рис. 3) расположена в горизонтальной плоскости СВЧ-излучения. Сформированное зеркалами с юстировочными устройствами  $m1-m4$  излучение Х-волны попадает в камеру стелларатора в виде гауссова пучка с радиусом в центре плазмы 20 мм (на уровне  $e^{-1}$  по мощности).

Зеркала поляризатора  $p1$  и  $p2$  позволяют менять исходную вертикальную поляризацию волнового пучка на любую требуемую в эксперименте. Изменение поляризации производится путем вращения гофрированных зеркал  $p1, p2$  вокруг осей, перпендикулярных их поверхностям. Углы поворота зеркал  $\psi_1, \psi_2$  относительно плоскости падения излучения определяют параметры поляризации волнового пучка, поступающего в плазму. Для отсчета значений углов  $\psi_1, \psi_2$  зеркала поляризаторов снабжены соответствующими лимбами.

Проходящая и отраженная мощности в тракте для многочастотного гиротрона регистрируются СВЧ-детекторами, мощность в которые поступает через соответствующие направленные ответвители. Ответвители выполнены на основе стандартного одномодового прямоугольного волновода сечением  $3,6 \times 1,8$  мм и оканчиваются стандартным для этого диапазона фланцевым соединением. Волноводы связаны с падающим на зеркала  $m1, m4$  излучением определенным набором отверстий. Предполагаемая направленность для обоих ответвителей — 20 дБ. Развязка между прямым и отраженным излучением для ответвителя отраженной мощности — 30 дБ.

Необходимой частью гиротронных комплексов является аппаратура для измерения СВЧ-излучения большой мощности. Как правило, такие измерения осуществляются специально разработанными (или адаптированными) калориметрами для каждого типа гиротронов и каждого тракта передачи СВЧ-излучения от гиротрона в камеру установки. К настоящему времени в ИПФ РАН и ИОФ РАН накоплен большой опыт разработки, создания и использования калориметров для измерения

мощного СВЧ-излучения. Для комплекса МИГ-3 в ИПФ РАН создан новый поточный водяной калориметр. В квазиоптическом тракте смонтировано поворотное зеркало, которое позволяет направлять СВЧ-излучение гиротрона при измерении мощности в поточный калориметр. Калориметр представляет собой водяную СВЧ-нагрузку в виде цилиндра длиной 150 см и диаметром 40 см, намотанный тефлоновой трубкой диаметром 10 мм, длиной 25 м в три параллельные секции, по которой непрерывно с постоянной скоростью протекает дистиллированная вода. Калориметр расположен вертикально, а в нижнем конце нагрузки расположен эллипсообразный отражатель (рассеиватель). Сфокусированный пучок гиротрона вводится поворотным зеркалом через диафрагму диаметром 100 мм внутрь цилиндра и, отражаясь от рассеивателя, квазиравномерно распределяется по всему калориметру. Равномерное распределение и поглощение СВЧ в калориметре препятствует возникновению обратного отражения в гиротрон. Погрешность измерения СВЧ-мощности составляет 10 %. При настройке гиротрона проводятся измерения СВЧ-мощности гиротрона поточным калориметром при изменении магнитного поля, анодного и катодного напряжений.

### ***Блок автоматизированного управления гиротронным комплексом***

Система автоматизированного управления гиротронным комплексом содержит в своем составе подсистему управления электропитанием гиротронов, подсистему управлением регистрирующей аппаратурой и операторскую подсистему.

#### *Система управления гиротронным комплексом*

Гиротронный комплекс включает в свой состав три контура заземления: силовая земляная шина (гиротронная земля), приборная земля (корпусная) и отдельный контур заземления для компьютерных сетей (системы хранения, обработки информации и управления).

Для обмена данными между регистрирующей аппаратурой и различными системами хранения и обработки информации на базе протокола Ethernet построена локальная сеть. Передача информации от регистрирующих устройств и связь с внешней сетью института осуществляются только посредством медиа-конвертеров. Они необходимы для надежной гальванической развязки устройств посредством передачи данным через оптоволокно. Питание компьютерной сети осуществляется

только от одной фазы. Все устройства сети имеют одну шину заземления, соединенную с измерительной землей установки стелларатор Л-2М.

Подсистема управления электропитанием гиротронов состоит из компьютера с установленным клиентским приложением ADAMView, специализированным могоканальным таймером, системой спряжения и защиты с блоком питания гиротронов. Подсистема управления передает и принимает команды системе электропитания гиротронов через опторазвязанный RS485-интерфейс. Таймер разработан в ИОФ РАН и предназначен для вариативного задания времени работы источников электропитания гиротронов, формирования сигналов старт/стоп для блока сопряжения и защиты и выработки синхроимпульсов для запуска триггеров регистрирующей аппаратуры. Таймер содержит три независимых опторазвязанных линии, плюс одну — виртуальную. Точность установки временных интервалов составляет 10 мкс.

#### *Система сбора и хранения данных*

Система сбора и хранения данных содержит три подсистемы: высокоскоростную и низкоскоростную систему сбора данных, а также распределенную систему хранения данных. Низкоскоростная подсистема предназначена для регистрации макропараметров источников питания гиротронов. Данная подсистема построена на платформе рхi фирмы Adlink и позволяет регистрировать напряжение катода, напряжение анода, ток катода и ток анода с частотой оцифровки не менее 250 кГц на канал при 16-битном разрешении по амплитуде. Одновременно в универсальное гибридное рхi-шасси установлена мультифункциональная плата для работы с калориметром.

Высокоскоростная подсистема предназначена для регистрации сигналов СВЧ-диагностик. Данная подсистема является составной частью 64-канальной системы сбора данных стелларатора Л-2М, разработанной в ИЯФ РАН. Она включает в себя два идентичных друг другу 32-канальных блока. Данные блоки позволяют оцифровывать сигнал с 12-битным разрешением по амплитуде и с частотой оцифровки до 50 МГц, и представляют собой функционально законченные устройства в конструктивном исполнении "евромеханика".

Подсистема хранения данных о режимах работы комплекса МИГ-3 (анодные и катодные напряжения и токи гиротронов, токи криомагнитов, калориметрические измерения мощности, показания детекторов СВЧ и др.) хранятся в сетевом файловом хранилище.



### Результаты первых экспериментов по ЭЦ-нагреву плазмы с использованием комплекса МИГ-3

Результатом ЭЦ-нагрева плазмы в стеллараторе является получение разряда высокой плотности и температуры. На первом этапе работы комплекса в качестве примера представим один из первых разрядов в стеллараторе Л-2М с использованием комплекса МИГ-3 [14]. На рис. 4 (сверху вниз) представлены в течение разряда изменение средней плотности, температуры электронов в центре и на краю шнура, свечения линии водорода  $H_{\alpha}$ , запасенной в плазме энергии и мощности излучения гиротрона. Разряд начинается на 47 мс от начала импульса магнитного поля с включением импульса гиротрона. Мощность излучения за 1—2 мс возрастает до 400 кВт. Ионизация находящегося в вакуумной камере водорода и образование плазмы происходят, примерно, за это же время. Плотность плазмы нарастает до  $2 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$ . Излучение линии водорода  $H_{\alpha}$  спадает почти до нуля. Это свидетельствует о полной ионизации водорода, напущенного в камеру перед началом разряда. Затем интенсивность линии  $H_{\alpha}$  слегка подрастает и остается почти постоянным в течение всего импульса нагрева. Это происходит за счет поступления газа со стенок камеры. Плотность плазмы после небольшого спада в начале разряда медленно растет. Нагрев плазмы занимает около 5 мс и уже к 53 мс электронная температура в центре шнура достигает стационарного значения в центре шнура  $T_e(0) \approx 800 \text{ эВ}$ . В дальнейшем  $T_e(0)$  немного снижается из-за роста плотности. При этом запасенная энергия остается постоянной. Величина запасенной энергии  $W \approx 700 \text{ Дж}$  при мощности нагрева  $P = 400 \text{ кВт}$  дает для времени жизни энергии  $\tau_E \approx 1,7 \text{ мс}$ .

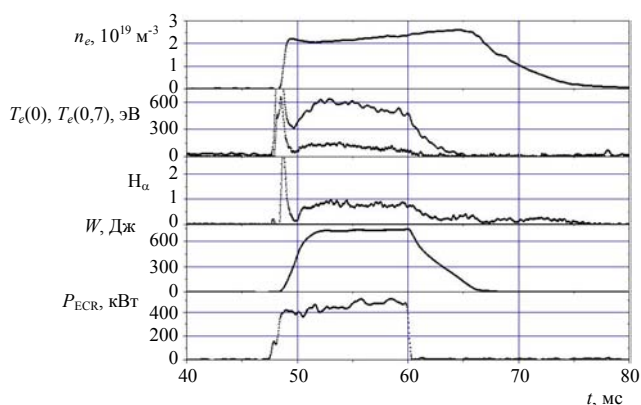


Рис. 4. Основные параметры разряда при ЭЦ-нагреве плазмы в стеллараторе Л-2М с использованием одночастотного гиротрона "Борец 75/0,8" комплекса МИГ-3. Мощность гиротрона — 400 кВт. Разряд 64429

На втором этапе эксперимент был выполнен с использованием одновременно двух гиротронов.

Временной режим работы гиротронов и параметров разряда в стеллараторе приведен на рис. 5 (нижний график). В данном сценарии работы комплекса МИГ-3 сначала запускался многочастотный гиротрон на частоте 74,8 ГГц с длительностью импульса 6 мс. Через 4 мс после запуска многочастотного гиротрона включался одночастотный гиротрон с длительностью импульса 6 мс. Таким образом, в течение 2 мс работали одновременно оба гиротрона, в это время суммарная мощность могла достигать величины 400—500 кВт, а в приведенном разряде суммарная мощность гиротрона достигала 380 кВт.

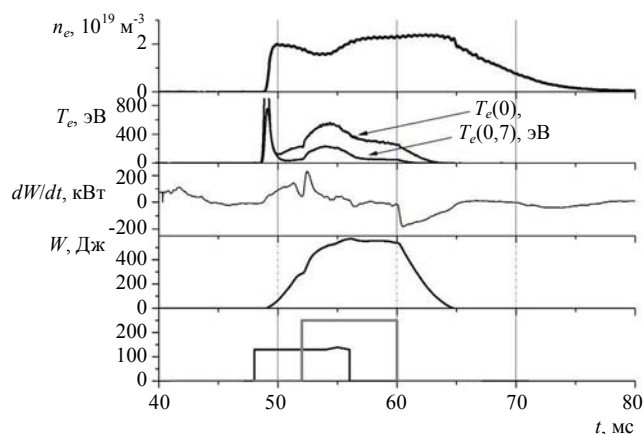


Рис. 5. Основные параметры разряда при ЭЦ-нагреве плазмы в стеллараторе Л-2М с использованием двух гиротронов комплекса МИГ-3.

Мощности гиротронов: многочастотного — 130 кВт, одночастотного — 250 кВт. Разряд 16678

В течение разряда после включения многочастотного гиротрона (130 кВт) наблюдалось падение средней по лучу электронной плотности, рост плотности возобновлялся после включения второго одночастотного гиротрона. При одновременном включении двух гиротронов наблюдался рост электронной температуры как в центре (74 ГГц), так и на нормированном радиусе, равном 0,7 (68 ГГц). Сложную форму имеет производная энергосодержания плазмы, полученная при помощи диамагнитных измерений. На ее начальной стадии отображаются два пика, связанные с включением обоих гиротронов, далее следует выключение первого гиротрона и, наконец, на 60 мс — выключение второго. На осциллограмме энергосодержания виден эффект от работы второго гиротрона как добавление к "пьедесталу", полученному при работе первого гиротрона. Полная энергия при работе двух гиротронов достигла 600 Дж. Энергетическое время жизни на стадии работы одного гиротрона и при работе с обоими гиротронами 2 мс.

### Заключение

Для создания и нагрева плазмы в стеллараторе Л-2М запущен новый гиротронный комплекс МИГ-3. Гиротронный комплекс МИГ-3 состоит из двух трехэлектродных гиротронов с рекуперацией энергии электронного пучка: одночастотного (75,1 ГГц) и многочастотного (71,5, 74,8 и 78,2 ГГц) с генерацией суммарной СВЧ-мощности до 1,4 МВт. Комплекс МИГ-3 позволяет осуществлять работу двух гиротронов как в отдельности, так и одновременно по заданному временному сценарию. Указанные возможности нового гиротронного комплекса МИГ-3 позволяют обратиться в экспериментах к изучению таких важных для удержания плазмы в стеллараторе Л-2М задач, которые раньше были невыполнимы: роли аномального переноса в широком интервале значений вводимой в плазму мощности; поведения плазмы в стеллараторе Л-2М при достижении предельного значения параметра  $\beta$ ; поведения плазмы при приближении к режиму переноса с низкими частотами столкновений; влияния на радиальные профили плазмы и на L—H-переход в стеллараторе Л-2М изменения частоты генерации многочастотного гиротрона.

Первые эксперименты с использованием нового гиротронного комплекса МИГ-3 подтвердили новые возможности исследования удержания плазмы в стеллараторе Л-2М. Необходимо отметить, что на Л-2М осуществлены как режимы с работой отдельных гиротронов, так и режим одновременной работы обоих гиротронов по временному сценарию с перекрытием их генерации. С учетом полученных результатов планируется в будущем продолжить эксперименты по исследованию высокотемпературной плазмы в стеллараторе Л-2М с применением для создания и нагрева плазмы гиротронного комплекса МИГ-3.

*Работа выполнена при поддержке Госконтракта  
Мниобрнауки П77 и проекта РФФИ  
№ 11-08-01129-а.*

### Литература

1. Tanaka K., Michael C., Sanin A. L., Vyacheslavov L.N. et al. // Nucl. Fusion. 2006. V. 46. P. 110.
2. Skvortsova N. N., Batanov G. M., Kolik L. V., Petrov A. E. et al. Low-frequency structural plasma turbulence in stellarators / In Stochastic Models of Structural Plasma Turbulence. VSP, Leiden-Boston. The Netherlands. 2006.
3. 17<sup>th</sup> International Toki Conference on Physics of Flows and Turbulence in Plasmas, Toki. Japan. 2007. <http://itc.nifs.ac.jp/>
4. Rhodes T. L., Peebles W. A., DeBoo J. C., Prater R. et al. // Plasma Phys. Control. Fusion. 2006. V. 48. P. B183.
5. Skvortsova N. N., Akulina D. K., Batanov G. M., Voronov G. S. et al. // Plasma Phys. Control. Fusion. 2010. V. 52. P. 055008.
6. Батанов Г. М., Борзосеков В. Д., Колик Л. В., Малыхов Д. В. и др. // ВАНТ. 2011. № 2. С. 70.
7. Федянин О. И., Акулина Д. К., Батанов Г. М. и др. // Физика плазмы. 2007. Т. 33. № 10. С. 880.
8. Abrakov V. V., Akulina D. K., Andryukhina E. D. et al. // Nuclear Fusion. 1997. V. 37. P. 233.
9. Скворцова Н. Н. Электронно-циклотронный нагрев плазмы в тороидальной установке: Уч. пособие МИРЭА "Специальные разделы физики". — М.: МИРЭА, 2011. С. 78.
10. Denisov G. G., Zapevalov V. E., Litvak A. G., Myasnikov V. E. // Radiophysics and Quantum Electronics. 2003. V. 46. No. 10. P. 757.
11. Litvak A. G., Denisov G. G. et al. Development in Russia of High Power Gyrotrons for Fusion / 21th IAEA Fusion Energy Conf. Chengdu. 2006. П/2-4Rb.
12. Fernández Á., Likin K., Batanov G., Kolik L. et al. // NATO Science Series II: Mathematics, Physics and Chemistry. 2005. V. 203. P. 115.
13. Batanov G. M., Kolik L. V., Novozhilova Yu. V., et al. // Technical Physics. 2001. V. 46. No. 5. P. 56.
14. Kharchev N. K., Batanov G. M., Berezhetskii M. S., Borzosekov V. D. et al. Recent ECRH experiments in the L-2M stellarator with the use of a new high-power gyrotron / 20th Int. Toki Conf. The next Twenty years in Plasma and Fusion Science. NIFS. 2010.

## New gyrotron complex "MIG-3" for plasma creating and heating in the L-2M stellarator and first experimental results

G. M. Batanov, Yu. F. Bondar, V. D. Borzosekov, D. G. Vasilkov, S. E. Grebenshchikov,  
L. V. Kolik, E. M. Konchekov, D. V. Malakhov, A. I. Meshcheryakov, A. E. Petrov,  
K. A. Sarkcyan, N. N. Skvortsova, V. D. Stepakhin, N. K. Kharchev, Yu. V. Kholnov  
General Physics Institute named after A. M. Prokhorov  
38 Vavilov str., Moscow, 119991, Russia  
E-mail: batanov@fpl.gpi.ru

V. I. Belousov  
Institute of Applied Physics. RAS  
46 Ul'yanov str., Nizhny Novgorod, 603950, Russia



*I. A. Ivannikov, N. V. Matveev*  
High-Voltage Research Center  
5 Zavodskaya str., Istra, Moscow Region, 143502, Russia

*E. M. Tayi*  
GIKOM-NN  
7 Larin str., Nizhny Novgorod, 603107, Russia

***A new gyrotron complex "MIG-3" for plasma creating and heating in the L-2M stellarator has been presented. The first experimental results are discussed. The complex consists of two powerful gyrotrons of new generation, a high-voltage modulator, and a control block. The total specific power to be inserted in plasma is 5 MW/m<sup>3</sup>.***

PACS: 52.50 Sw, 52.55 Hc

*Keywords:* gyrotron, plasma, stellarator, heating, modulator, control block.

Bibliography — 14 references.

*Received July 15, 2012*