

УДК 533.9.082.74

## АНАЛИЗ ФИЗИЧЕСКИХ И ИНЖЕНЕРНЫХ ВОЗМОЖНОСТЕЙ РЕАЛИЗАЦИИ ДИАГНОСТИКИ “РЕФЛЕКТОМЕТРИЯ” НА УСТАНОВКЕ T-15МД

© 2022 г. Д. А. Шелухин<sup>а, \*</sup>, Г. Ф. Субботин<sup>а</sup>, В. А. Вершков<sup>а</sup>, И. А. Владимиров<sup>а</sup><sup>а</sup> НИЦ “Курчатовский институт”, Москва, Россия

\*e-mail: shelukhin\_da@nrcki.ru

Поступила в редакцию 31.03.2022 г.

После доработки 04.05.2022 г.

Принята к публикации 10.05.2022 г.

Рефлектометрия в настоящий момент рассматривается как одна из перспективных диагностик для измерения параметров плазмы в термоядерных установках. Диагностика имеет хорошую совместимость с высокими потоками нейтронов, устойчива к механическим и тепловым нагрузкам во время плазменного режима, имеет малую чувствительность к пыли. Рефлектометрия широко применяется на существующих установках для измерения профиля электронной плотности и параметров флуктуаций плотности. В данной работе проводится анализ возможностей диагностики на введенной в строй установке T-15МД с точки зрения физической возможности проведения измерений, требуемых параметров рефлектометров, технической реализуемости с учетом современного развития микроволновой техники и опыта работы аналогичных диагностик в России и за рубежом. При создании диагностики предлагается широко использовать наработки, сделанные в ходе создания диагностики “Рефлектометрия ИТЭР со стороны сильного магнитного поля”. Используемые подходы могут быть применены при создании рефлектометров на других плазменных установках.

*Ключевые слова:* токамак, рефлектометрия

**DOI:** 10.31857/S0367292122100225

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Опыт исследования транспортных процессов в высокотемпературной плазме токамаков показывает, что неидеальный перенос и турбулентность играют большую роль в переносе частиц и энергии в разряде [1]. Для исследования турбулентных процессов в плазме применяются различные диагностики: зонды Ленгмюра [2], активная рекомбинационная спектроскопия [3], зондирование плазмы пучком тяжелых ионов [4] и др. Одним из методов, широко применяющихся при исследовании мелкомасштабных флуктуаций в плазме, является корреляционная рефлектометрия [5].

Помимо непосредственного измерения параметров флуктуаций в настоящее время рефлектометрия широко используется для измерения профиля электронной плотности в лабораторных термоядерных установках, в том числе ASDEX-Urg [6], JET [7], DIII-D [8], TORE-SUPRA [9] и др. В Российской Федерации в рамках работ по созданию диагностики “Рефлектометрия со стороны сильного магнитного поля” для установки ИТЭР были успешно проведены измерения профиля электронной плотности на установке T-

10 [10]. Наибольшее распространение при этом получила методика, основанная на быстром изменении частоты зондирующего излучения с регистрацией разности частот излучаемого и отраженного сигналов – Frequency Modulated Continuous Wave (FMCW, непрерывная волна с частотной модуляцией) [11]. Еще одним интересным применением рефлектометра является работа в так называемом рефрактометрическом режиме, когда в плазме отсутствует область непрозрачности и диагностика может дать информацию об интегральных характеристиках плазмы вдоль луча наблюдения [12].

Данная работа посвящена анализу возможностей для реализации рефлектометрии на установке T-15МД. После краткого введения, в разд. 2 изложены основные принципы рефлектометрии и проведен анализ возможности реализации диагностики на T-15МД в различных сценариях разряда. Раздел 3 посвящен анализу инженерных особенностей диагностики, размещению элементов на установке T-15МД и оптимизации конструкции диагностической системы. В разд. 4 представлена предлагаемая схема рефлектометра, а также приведены оценки требуемых параметров

оборудования и возможные примеры его реализации. В заключении кратко перечислены основные положения работы.

## 2. АНАЛИЗ ВОЗМОЖНОСТЕЙ ПРОВЕДЕНИЯ ИЗМЕРЕНИЙ НА Т-15МД С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ РЕФЛЕКТОМЕТРИИ

Рефлектометрия – активная диагностика, основанная на отражении зондирующего излу-

чения малой мощности от слоя плазмы с параметрами, определяемыми частотой зондирующего излучения, электронной плотностью плазмы и величиной внешнего магнитного поля [13], а также, с учетом релятивистской поправки, и электронной температурой [14]. В общем виде показатель преломления для электромагнитной волны, распространяющейся в плазме с магнитным полем, определяется уравнением Апплтона [15]

$$\varepsilon = 1 - \frac{X^2(1 - X^2)}{1 - X^2 - \frac{1}{2}Y^2 \sin^2 \theta \pm \left[ \left( \frac{1}{2}Y^2 \sin^2 \theta \right)^2 + (1 - X^2)^2 Y^2 \cos^2 \theta \right]^{1/2}}$$

$$X = \frac{\omega_{pe}}{\omega}, \quad Y = \frac{\omega_{ce}}{\omega}$$

где  $\omega_{pe} = \sqrt{n_e e^2 / m_e \varepsilon_0}$  – плазменная частота,  $\omega_{ce} = eB / m_e c$  – электронная циклотронная частота,  $\omega = 2\pi F$  – частота зондирующего излучения и  $\theta$  – угол между магнитным полем и направлением распространения волны. Здесь и далее  $n_e$  – концентрация электронов,  $m_e$  – масса электрона,  $e$  – заряд электрона,  $c$  – скорость света в вакууме и  $B$  – величина внешнего магнитного поля. В случае распространения электромагнитных волн в направлении перпендикулярном магнитному полю,  $\theta = \pi/2$  уравнение упрощается и имеет два решения для обыкновенной (“О-”) и необыкновенной (“Х-”) мод зондирующего излучения соответственно:

$$\varepsilon^O = 1 - X^2 \quad (O - \text{мода})$$

$$\varepsilon^X = \frac{(1 - X^2)^2 - Y^2}{1 - X^2 - Y^2} \quad (X - \text{мода}) \quad (1)$$

В области плазмы, где показатель преломления становится равен нулю, происходит отражение зондирующего сигнала с заданной частотой, называемой также частотой отсечки  $F_{cutoff}$ , определяемой соотношениями

$$F_{cutoff} = \begin{cases} \omega_p / 2\pi & (O - \text{мода}) \\ \frac{1}{2\pi} \left( \sqrt{\omega_p^2 + (\omega_c/2)^2} - (\omega_c/2) \right) & (X - \text{мода, ниж. отс.}) \\ \frac{1}{2\pi} \left( \sqrt{\omega_p^2 + (\omega_c/2)^2} + (\omega_c/2) \right) & (X - \text{мода, верх. отс.}) \end{cases} \quad (2)$$

При анализе работы рефлектометра для изменения профиля плотности практическое значение имеет также время распространения зондирующего сигнала от антенны до области отражения и назад  $\tau_{TFD}$  (т.н. Time Flight Delay – TFD):

$$\tau_{TFD} = 2 \int_{R_A}^{R_{cutoff}} dl / v_g, \quad (3)$$

где  $R_A$  соответствует положению антенн диагностики,  $R_{cutoff}$  – области отражения, а  $v_g$  – групповая скорость зондирующего излучения в плазме. Пользуясь определением групповой скорости [13], можно выразить ее через диэлектрическую проницаемость среды:

$$v_g = \frac{\partial \omega}{\partial k} = \frac{\partial(2\pi F)}{\partial(2\pi/\lambda)} = \frac{\partial F}{\partial(F\sqrt{\varepsilon(F)}/c)} =$$

$$= c \frac{\partial F}{\partial(F\sqrt{\varepsilon(F)})} = \frac{c}{G(F)}. \quad (4)$$

Раскрывая производную и используя выражения (1) для диэлектрической проницаемости, получаем следующее соотношение для функции, описывающей замедление необыкновенной волны в среде

$$C(F) = \frac{\partial(F\sqrt{\varepsilon(F)})}{\partial F} = \sqrt{\varepsilon(F)} + \frac{F}{2\sqrt{\varepsilon(F)}} \frac{\partial \varepsilon(F)}{\partial F} \quad (5)$$

$$\frac{F}{2} \frac{\partial \varepsilon(F)}{\partial F} = X^2 \frac{(1 - X^2)^2 + X^2 Y^2}{(1 - X^2 - Y^2)^2}.$$

Можно показать, что в пределе  $B = 0$  формулы (4) и (5) приводят к известной формуле для групповой скорости обыкновенной волны  $v_g = \varepsilon^{1/2} c$ . Отметим также, что для практических применений формулу (3) удобнее переписать в виде

$$\tau_{TFD} = 2 \int_{R_A}^{R_{cutoff}} \frac{dl}{v_g} = \frac{2}{c} \int_{R_A}^{R_{cutoff}} G(F) dl \quad (6)$$

### 2.1. Анализ доступности внутренних областей плазменного шнура для рефлектометрии в различных режимах работы установки

Первичный анализ при оценке работоспособности рефлектометрии на установке начинается с анализа характерных частот отсечки для разных типов волн. Следует также учесть и существование в плазме областей непрозрачности, связанных с наличием основной и высших гармоник циклотронного резонанса. Если резонанс располагается между антенной и областью отражения, это делает прохождение волны на данной частоте невозможным.

В качестве базовых профилей основных параметров плазмы были выбраны профили для основного индуктивного сценария работы Т-15МД [16] (рис. 1). Помимо основного сценария, для установки Т-15МД также планируется работа в квазистационарном режиме с уменьшенными значениями магнитного поля (1.0 Т и 1.5 Т) [17]. При анализе этих режимов локальные значения электронной плотности и магнитного поля снижались пропорционально снижению тороидального поля на оси камеры для сохранения значения фактора запаса устойчивости и отношения средней плотности электронов к плотности Гринвальда. Значения характерных частот плазмы рассчитывались с использованием соотношений (2). При анализе возможностей рефлектометрии целесообразно придерживаться порядка, определяемого особенностями интерпретации измерений и техническими сложностями при реализации конкретной схемы измерений.

Самой простой схемой традиционно считается схема с использованием для измерений зондирования на обыкновенной волне. К достоинствам этой схемы относится удобный диапазон частот (как правило от 18 до 60 ГГц в существующих установках) и простота интерпретации данных, так как в уравнения для частоты отсечки и диэлектрической проницаемости не входит магнитное поле.

Зондирование с использованием верхней отсечки необыкновенной волны широко применяется при измерении профиля электронной плотности. Это связано с тем, что нулевая электронная плотность соответствует конечной частоте рефлектометра (согласно (2)), что позволяет проводить измерения в области за сепаратрисой. К недостаткам этого метода относятся более высокие частоты генераторов СВЧ-излучения и большая чувствительность к мелкомасштабным возмущениям электронной плотности.

Зондирование с использованием нижней отсечки необыкновенной волны для проведения измерений в центральной части плазменного шнура требует доступа со стороны сильного магнитного поля. Затрудненный доступ к экватори-

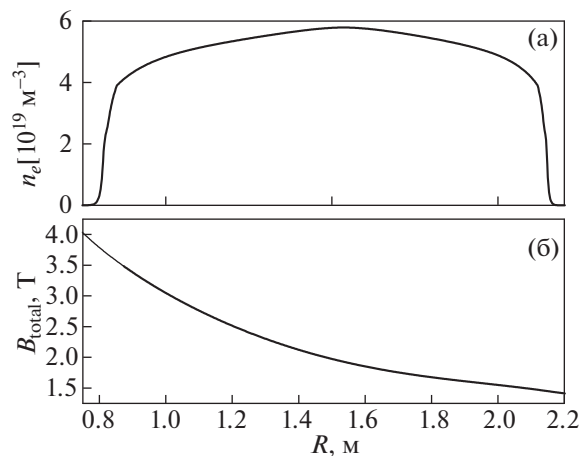


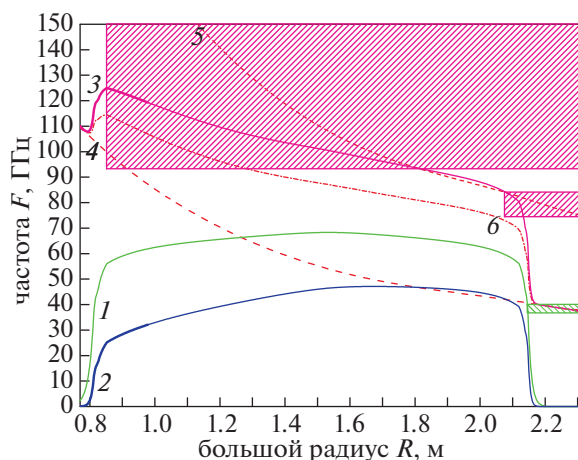
Рис. 1. Профили основных параметров разряда на установке Т-15МД в режиме с тороидальным полем 2.0 Т. а) — локальная электронная плотность; б) — полное магнитное поле.

альной плоскости на внутренней стенке вакуумной камеры накладывает существенные ограничения на конструкцию волноводного тракта и антенной системы. Поэтому, несмотря на преимущества в виде низких частот генераторов и слабого влияния турбулентности, использование такой конфигурации носит единичный характер.

### 2.2. Режим с тороидальным полем 2.0 Т

Профили характерных частот для режима с тороидальным полем на оси 2.0 Т приведены на рис. 2. Прежде всего, следует отметить, что при максимальных значениях электронной плотности на токамаке Т-15МД отсутствует окно прозрачности между верхней и нижней отсечкой необыкновенной волны. Это делает невозможным работу рефлектометра в рефрактометрическом режиме (рефлектометра) на установке Т-15МД при зондировании плазмы на необыкновенной волне. Реализация рефлектометра на обыкновенной волне возможна, однако требует использования частот выше фундаментальной частоты циклотронного резонанса (110 ГГц). Кроме того, из-за малого аспектного отношения, волна в этом случае проходит через второй циклотронный резонанс. Хотя оценки показывают, что ослабление обыкновенной волны невелико в режимах с малыми электронными температурами, можно ожидать увеличения потери с ростом температуры.

Рефлектометр с использованием обыкновенной волны излучения требует использование генераторов с частотами до 70 ГГц. При этом при зондировании со стороны слабого магнитного поля в области плеча барьера ( $R \sim 2.15$  м) существует область поглощения на фундаментальной гармонике циклотронного резонанса. Размеры



**Рис. 2.** Профили характерных частот для режима установки Т-15 МД с тороидальным полем на оси 2.0 Т. Заштрихованные области показывают зоны, в которых проведение измерений невозможно. 1 – отсечка обыкновенной волны, 2 – нижняя отсечка необыкновенной волны, 3 – верхняя отсечка необыкновенной волны, 4 – фундаментальная частота электронного циклотронного резонанса, 5 – вторая гармоника электронного циклотронного резонанса, 6 – верхний гибридный резонанс.

этой области составляют несколько сантиметров, что не представляет большой проблемы при исследовании параметров турбулентности. При измерении профиля электронной плотности с помощью рефлектометрии используется итерационный алгоритм определения положения до области отсечки [10]. Наличие областей, в которых невозможно провести измерения, затрудняет или делает невозможным восстановление профиля. В данном случае гарантированно можно проводить измерения на периферии плазменного шнура до области поглощения. Во внутренних частях шнура измерения возможны, однако точность восстановления профиля будет сильно зависеть от успешности аппроксимации зависимости частоты биений от зондирующей частоты в области непрозрачности.

Использование сочетания необыкновенной волны и зондирования со стороны сильного магнитного поля позволяет проводить измерения профиля электронной плотности вплоть до центральной части шнура. Измерение параметров флуктуаций электронной плотности возможно, однако эксперименты на установке Т-10 показали, что поведение турбулентности на стороне сильного магнитного поля слабо изменяется при изменении условий в плазме токамака [18]. К сожалению, на настоящий момент нет независимого подтверждения данного факта, а единственная работа по изучению параметров турбулентности со стороны сильного поля с помощью рефлектометров ограничивалась областью вблизи послед-

ней замкнутой магнитной поверхности [19]. Максимальная частота СВЧ-источника при использовании данной схемы измерений не должна превышать 50 ГГц.

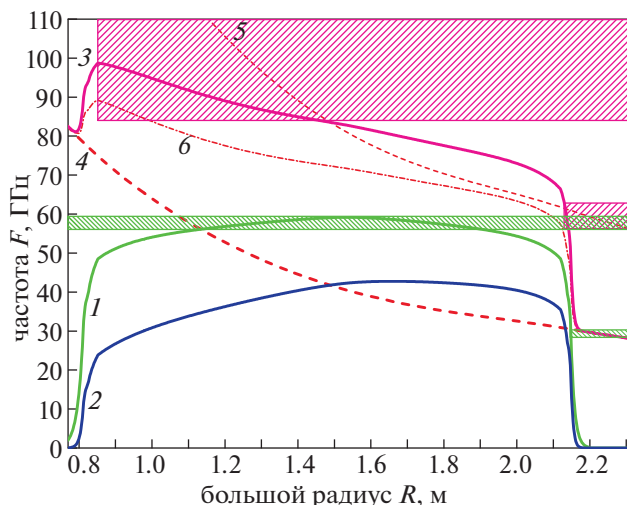
Использование верхней отсечки необыкновенной волны оправдано только для проведения измерений профиля электронной плотности. К сожалению, использование данной конфигурации для проведения измерений в центральной части шнура невозможно из-за сильного поглощения на второй гармонике циклотронного резонанса. Однако, для отдельных задач, таких как: измерения профиля электронной плотности на периферии шнура и в области барьера – применение такой конфигурации может быть оправдано. Характерные частоты генераторов должны составлять от 35 до 85 ГГц. Следует особо отметить, использование сочетания нижней отсечки необыкновенной волны и зондирования со стороны слабого магнитного поля для измерения параметров в центральной части плазменного шнура невозможно из-за перекрытия с верхней отсечкой.

### 2.3. Режим с тороидальным полем 1.5 Т

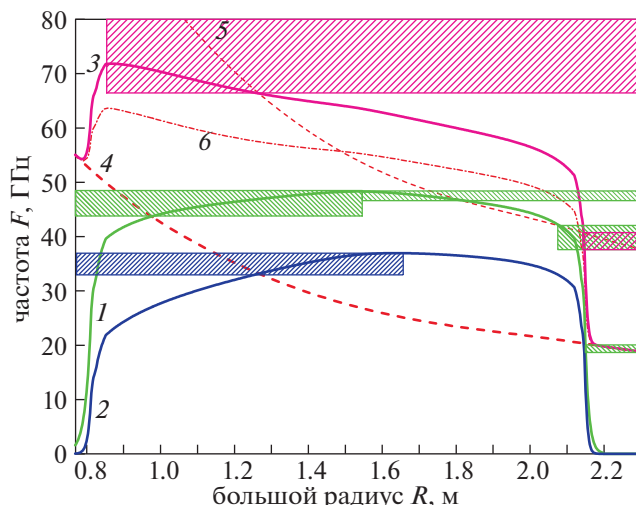
Профили характерных частот для режима с тороидальным полем на оси 1.5 Т приведены на рис. 3. Использование для измерений обыкновенной волны зондирующего излучения требует частот СВЧ-генераторов рефлектометра до 60 ГГц. В данном режиме центральная часть шнура недоступна ни для наблюдения со стороны низкого магнитного поля (поглощение на второй гармонике циклотронного резонанса), ни со стороны высокого магнитного поля (поглощение на фундаментальной гармонике циклотронного резонанса). Кроме этого, при зондировании со стороны слабого магнитного поля в области плеча барьера ( $R \sim 2.15$  м) существует область поглощения на фундаментальной гармонике циклотронного резонанса. Размеры этой области достаточно малы, и, по-видимому, не будут представлять большой проблемы. В целом, схему с использованием зондирования на обыкновенной волне видимо можно будет использовать для измерения профиля электронной плотности и параметров турбулентности в области от половины малого радиуса до периферии плазменного шнура.

Использование сочетания необыкновенной волны и зондирования со стороны сильного магнитного поля позволяет проводить измерения профиля электронной плотности вплоть до центральной части шнура. Максимальная частота СВЧ-источника при этом не превышает 45 ГГц.

Использование верхней отсечки необыкновенной волны оправдано только для проведения измерений профиля электронной плотности. В области плеча барьера ( $R \sim 2.15$  м) существует об-



**Рис. 3.** Профили характерных частот для режима установки Т-15 МД с тороидальным полем на оси 1.5 Т. Заштрихованные области показывают зоны, в которых проведение измерений невозможно. 1 – отсечка обыкновенной волны, 2 – нижняя отсечка необыкновенной волны, 3 – верхняя отсечка необыкновенной волны, 4 – фундаментальная частота электронного циклотронного резонанса, 5 – вторая гармоника электронного циклотронного резонанса, 6 – верхний гибридный резонанс.



**Рис. 4.** Профили характерных частот для режима установки Т-15 МД с тороидальным полем на оси 1.0 Т. Заштрихованные области показывают зоны, в которых проведение измерений невозможно. 1 – отсечка обыкновенной волны, 2 – нижняя отсечка необыкновенной волны, 3 – верхняя отсечка необыкновенной волны, 4 – фундаментальная частота электронного циклотронного резонанса, 5 – вторая гармоника электронного циклотронного резонанса, 6 – верхний гибридный резонанс.

ласть поглощения на второй гармонике циклотронного резонанса. Размеры этой области составляют несколько сантиметров, и могут существенно затруднить измерения в центральной части шнура и снизить точность восстановления профиля электронной плотности. Характерные частоты генераторов, требуемые для проведения измерений, составляют от 25 до 85 ГГц.

#### 2.4. Режим с тороидальным полем 1.0 Т

Профили характерных частот для режима с тороидальным полем на оси 1.0 Т приведены на рис. 4. Данный режим является наиболее проблематичным с точки зрения использования обыкновенной волны, особенно при зондировании плазмы со стороны слабого магнитного поля.

В рассмотренных ранее режимах с полем 1.5 Т и 2.0 Т, в плазме существует единственная область поглощения для обыкновенной волны. Путем вариации параметров разряда (изменением плотность плазмы либо магнитного поля) можно вывести частоту зондирующего излучения из зоны поглощения при сохранении требуемого режима и области наблюдения. При измерении профиля электронной плотности единственная область поглощения располагается в зоне сильного градиента, где можно аппроксимировать данные и затем восстановить полную форму профиля.

В режиме с полем 1.0 Т для обыкновенной волны существуют три зоны поглощения и есть большая вероятность что хотя бы одна из этих зон будет находиться в области плазменного шнура, где профиль электронной плотности имеет особенность (например, плечо периферийного барьера). Это существенно затрудняет аппроксимацию данных области, перерывтой циклотронным резонансом, и дальнейшее восстановление профиля электронной плотности. При измерении флуктуаций также велика вероятность, что интересная для исследования область плазменного шнура будет перекрыта одним из циклотронных резонансов. Наличие нескольких зон поглощения снижает возможность получения доступа к интересующей области внутри плазменного шнура путем вариации параметров разряда по аналогии с режимами 1.5 Т и 2.0 Т.

Со стороны сильного магнитного поля недоступной оказывается вся центральная часть шнура. Таким образом, в режимах с тороидальным полем 1.0 Т использование обыкновенной волны для проведения измерений будет сильно затруднено. Максимальная частота СВЧ-генератора для данной конфигурации составляет около 50 ГГц.

Использование сочетания необыкновенной волны и зондирования со стороны сильного магнитного поля позволяет проводить измерения профиля электронной плотности от периферии до половины малого радиуса. Центральная часть

**Таблица 1.** Оптимальные конфигурации для проведения измерений профиля электронной плотности для режимов с различным тороидальным полем на установке токамак Т15-МД

Режим	Схема наблюдений		Область наблюдения	Частота	Примечания
	отсечка	антенны			
1.0 Т	XU	LFS	1.5–2.3 м	18–65 ГГц	Окно поглощения ~1–2 см
1.5 Т	XL	HFS	0.8–1.5 м	<45 ГГц	
2.0 Т	XL	HFS	0.8–1.5 м	<50 ГГц	

шнура недоступна из-за поглощения зондирующего излучения на фундаментальной гармонике циклотронного резонанса. Максимальная частота СВЧ-источника не превышает 40 ГГц.

Зондирование с использованием верхней отсечки необыкновенной волны возможно для проведения измерений профиля электронной плотности во всем объеме плазменного шнура. В области плеча барьера ( $R \sim 2.15$  м) существует область поглощения на второй гармонике циклотронного резонанса, однако размеры этой области составляют 1–2 сантиметра, и, по-видимому, могут быть преодолены при обработке данных. Характерные частоты генераторов, требуемые для проведения измерений, составляют от 18 до 65 ГГц.

### 2.5. Выбор оптимальных схем измерений

Конфигурации рабочих схем рефлектометра для различных режимов работы токамака приведены в табл. 1. XL и XU указывают на использование для измерений нижней и верхней отсечки необыкновенной волны, HFS и LFS – использование зондирования со стороны сильного и слабого магнитного поля соответственно.

Проведенный анализ показывает, что с точки зрения доступности оптимальным является использование для измерения профиля электронной плотности верхней отсечки необыкновенной волны и доступа со стороны слабого магнитного поля в режимах с низким магнитным полем (1.0 Т) и нижней отсечки необыкновенной волны и зондирования со стороны высокого магнитного поля в режимах 1.5 Т и 2.0 Т.

Следует отметить, что при использовании зондирования со стороны сильного магнитного поля существенным ограничением является размер используемого в передающей линии волновода. Интеграция волноводной линии и антенной системы возможна при использовании медных волноводов с внутренним сечением  $23 \times 10$  мм и толщиной стенки 1 мм [20]. Размер волновода ограничивает диапазон используемых частот снизу частотой 6.5 ГГц для необыкновенной волны, использующей волноводную моду  $TE_{10}$ , и 15.0 ГГц для обыкновенной волны, использующей волно-

водную моду  $TE_{01}$ . Анализ профилей частот отсечки показывает, что при этом минимальная частота отсечки будет находиться в области барьера, что затрудняет восстановление профиля и снижает точность измерений. Хотя на установке Т-10 ранее была продемонстрирована возможность использования для восстановления профиля электронной плотности данных других диагностик, такой подход является нежелательным.

Со стороны слабого магнитного поля ограничения на размер волноводных трактов отсутствуют и могут использоваться волноводы с внутренним сечением  $23 \times 10$  мм с оптимальным вводом излучения в плазму. Это дает значение минимальной рабочей частоты 6.5 ГГц. Таким образом, представляется целесообразным использование на установке Т-15МД следующего набора СВЧ-рефлектометров, приведенного в табл. 2 (названия СВЧ-диапазонов указаны по европейской номенклатуре).

Видно, что наиболее востребованными при проведении измерений являются СВЧ-источники в диапазонах частот К, Ка и U. Создание рефлектометров на данные диапазоны частот позволяет гибко менять схему измерений при изменении тороидального значения магнитного поля. Рефлектометры в диапазонах частот X и Ku могут быть получены путем использования задающих СВЧ-генераторов без оконечных умножителей, коаксиальных миксеров и коаксиально-волноводных переходов для согласования с передающей линией [10]. В настоящий момент генераторы и умножители на данные диапазоны частот освоены на установке Т-10. Расширение рабочего диапазона рефлектометра в диапазоны частот V или E потребуются после устойчивого достижения на установке Т-15МД режимов с высокой плотностью электронов.

### 3. РАЗМЕЩЕНИЕ И КОНСТРУКТИВНЫЕ ОСОБЕННОСТИ ОБОРУДОВАНИЯ ДИАГНОСТИКИ НА УСТАНОВКЕ Т-15МД

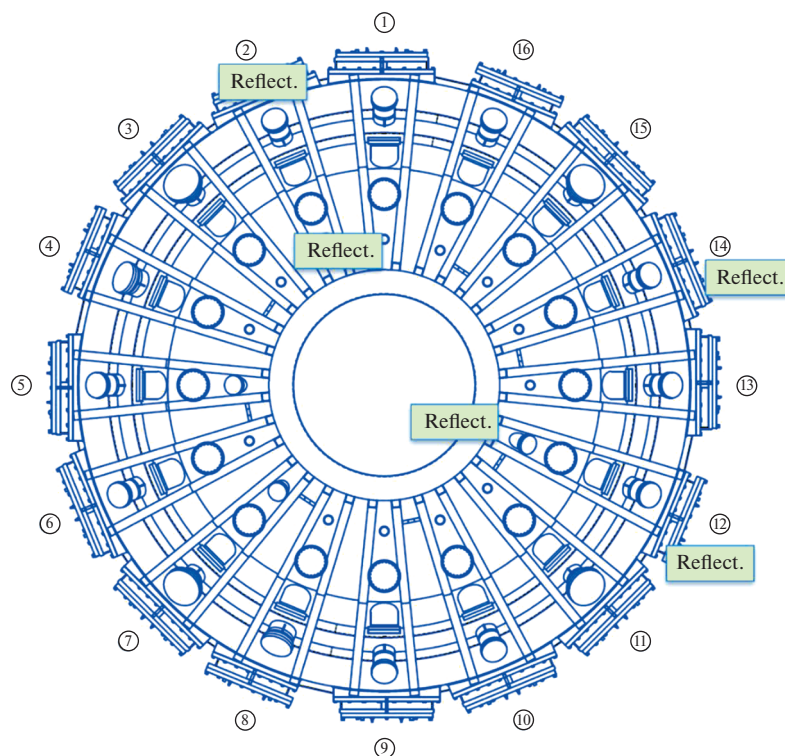
Диагностика “Рефлектометрия” на установке Т-15МД включает в себя управляющее и регистрирующее оборудование, системы генерации зондирующего излучения, системы слож-

Таблица 2. Диапазоны рефлектометров для установки Т-15 МД

Диапазон	Частота		Схема наблюдений		Измерений
	мин.	макс.	отсечка	антенна	
X	8.2	12.5	XL	HFS	Профиль плотности, $B > 1.2$ Т
			O	LFS	Параметры флуктуаций
Ku	11.9	18.0	XL	HFS	Профиль плотности, $B > 1.2$ Т
			O	LFS	Параметры флуктуаций
K	17.6	26.7	XL	HFS	Профиль плотности, $B > 1.2$ Т
			XU	LFS	Профиль плотности, $B < 1.2$ Т
			O	LFS	Параметры флуктуаций
Ka	26.3	40.0	XL	HFS	Профиль плотности, $B > 1.2$ Т
			XU	LFS	Профиль плотности, $B < 1.2$ Т
			O	LFS	Параметры флуктуаций
U	40.0	60.0	XU	LFS	Профиль плотности, $B < 1.2$ Т
			O	LFS	Параметры флуктуаций
V	50.0	75.0	O	LFS	Параметры флуктуаций
E	60.0	90.0	O	LFS	Параметры флуктуаций

ния/разложения сигналов разных частотных диапазонов и передающую линию. На установке Т-15МД существует возможность организовать гибкую систему рефлектометрии, позволяющую проводить как измерения профиля электронной плотности со стороны высокого магнитного поля, так и корреляционные измерения для исследования свойств флуктуаций. В разрабатываемой системе могут измеряться как полоидальные и радиальные корреляции, так и близкие и дальние тороидальные корреляции вдоль магнитного поля. Для системы рефлектометрии зарезервированы места в патрубках сечений 2, 12 и 14 (детали конструкции установки Т-15МД, включая нумерацию сечений и конструкцию портов можно найти в [16]). В сечениях 2 и 14 можно расположить по 2 комплекса антенн – со стороны сильного и слабого магнитного поля. Схема расположения диагностических патрубков рефлектометрии на установке Т-15МД представлена на рис. 5. На стороне слабого магнитного поля предполагается установка наварных патрубков на основной фланец порта установки. Общий вид патрубка токамака представлен на рис. 6. Патрубок позволяет производить обслуживание и модернизацию отдельных блоков антенн без снятия общей заглушки порта. При этом небольшие размеры патрубка обеспечивают возможность размещения нескольких блоков антенн в одном сечении или установку оборудования других диагностик сохраняя удобный доступ к заглушке порта.

На стороне сильного магнитного поля планируется разместить антенну в плоскости экваториального сечения токамака. Вход волноводной линии обеспечивается через верхний горизонтальный патрубок токамака. Основную сложность в создании передающей линии и антенн в данном случае представляют ограничения, накладываемые конструкцией камеры токамака. Волноводная линия и антенны должны находиться между защитными плитками первой стенки и вакуумной камерой. При этом волноводная траектория должна проходить вдоль верхней поверхности вакуумной камеры и после поворота на 90 градусов продолжаться вдоль центральной поверхности камеры. Так же антенный блок ограничен с одной стороны расстоянием между конструкционными ребрами вакуумной камеры, с другой стороны – расстоянием между камерой и первой стенкой токамака. Крепление передающей линии предполагается выполнить с использованием специальных опор в верхней части токамака и с помощью общего фланца антенного блока на стороне сильного магнитного поля в экваториальной области токамака (рис. 7 и 8). Антенный блок будет включать в себя три антенны: одну излучающую и две приемных. Предполагается использовать два варианта антенной системы для проведения измерений со стороны сильного магнитного поля. Первая система оптимизирована для проведения измерений профиля электронной плотности (рис. 8а), центры апертур рупоров для данной системы расположены в одной тороидальной плос-



**Рис. 5.** Расположение диагностических патрубков рефлектометрии на установке Т-15МД. Цифрами в кругах обозначены диагностические сечения установки. Места расположения диагностики “Рефлектометрия” на установке условно обозначены как “Reflect”.

кости. Вторая система оптимизирована для измерения параметров флуктуаций и отличается от первой смещением крайних рупоров относительно центрального в вертикальном (полоидальном) направлении (рис. 8б). Остановимся подробнее на отдельных элементах диагностики.

### 3.1. Антенный комплекс рефлектометрии на установке Т-15МД

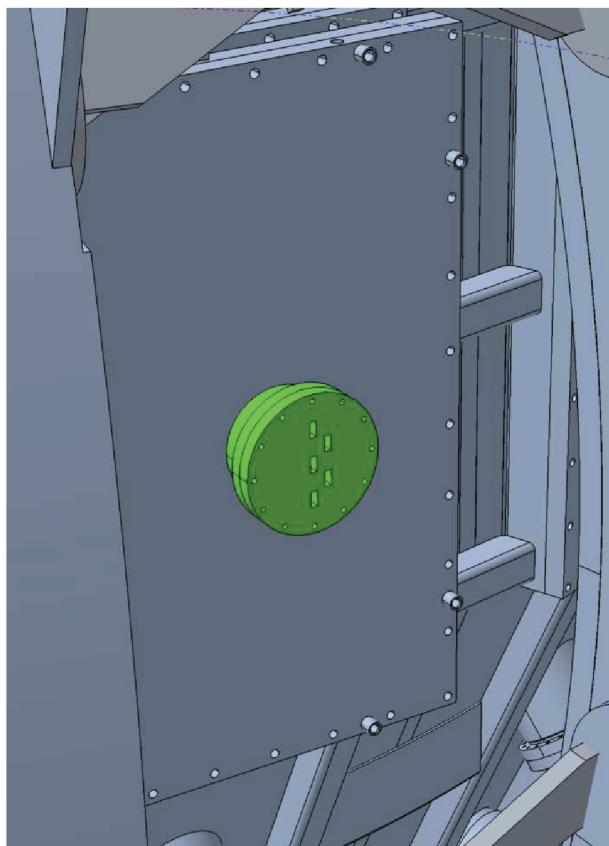
Для размещения антенн диагностики на стороне слабого магнитного поля на установке Т-15МД предполагается использование группы наварных фланцев, на которых закреплены антенные блоки (рис. 9). Антенны представляют собой пирамидальные рупора длиной 140 мм с апертурой  $46 \times 21$  мм. Широкая сторона рупора ориентирована вертикально. Такой рупор оптимален для проведения измерений с обыкновенной поляризацией зондирующей волны в плазме. Для проведения корреляционных измерений комплекс антенн включает в себя пять антенн, расположенных в шахматном порядке, что дает возможность проведения полоидальных и радиальных корреляционных измерений. В настоящий момент конструкция всех антенн одинакова и рассчитана на использование вакуумных окон и сверхразмерных прямоугольных волноводов ти-

поразмера  $23 \times 10$  мм. После уточнения параметров плазменных разрядов в установке Т-15МД (и, в особенности, базового значения тороидального магнитного поля) размер волноводов и конструкция антенн могут быть дополнительно оптимизированы.

СВЧ-параметры рупорной антенны рассчитывались с использованием полноволнового кода TAMIC RtX Analyzer [21]. Измерения параметров плазмы со стороны слабого магнитного поля планируется проводить в диапазоне частот зондирующего излучения от 8 до 90 ГГц. Для данного диапазона частот и поляризации, соответствующей обыкновенной волне в плазме, были рассчитаны диаграммы направленности и основные параметры антенны (коэффициент усиления антенны, ширина основного лепестка, отклонение максимума диаграммы направленности от нормали к апертуре антенны, уровень бокового лепестка). Расчеты проводились для частот от 10 до 90 ГГц с шагом 5 ГГц.

Пример диаграммы направленности на частоте 40 ГГц в полярных координатах (тороидальное и полоидальное сечения) приведен на рис. 10. Видно, что антенна хорошо формирует основной лепесток диаграммы направленности, а величина боковых лепестков мала.





**Рис. 6.** Пример размещения патрубка диагностики “Рефлектометрия” со стороны слабого поля на заглушке порта токамака.

Расчетные параметры антенн как функция зондирующей частоты приведены на рис. 11. Ширина диаграммы направленности в основном определяется дифракционной расходимостью зондирующего пучка и не может быть уменьшена при заданных ограничениях на размеры антенной системы. Уровень бокового лепестка диаграммы направленности антенны не превышает  $-12$  дБ.

Существенной проблемой при конструировании антенны рефлектометра для измерения профиля электронной плотности со стороны сильного магнитного поля является ограниченный размер области, в которой может быть расположена антенна. Основными ограничивающими факторами являются:

- необходимость размещения трех антенн (одна излучающая и 2 приемные) для использования антенной системы при измерении параметров флуктуаций плотности;
- наличие ребра жесткости на вакуумной камере в месте расположения средней волноводной линии;

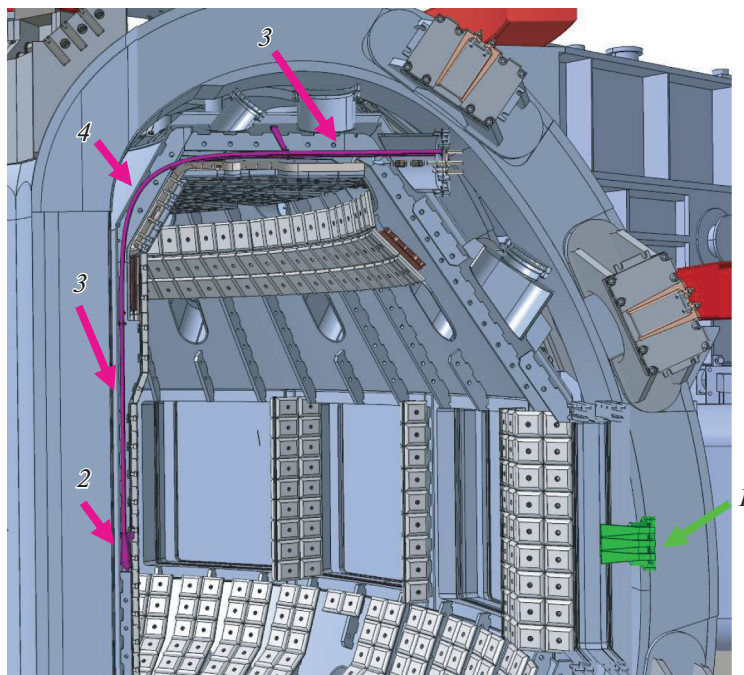
- наличие пластин для крепления графитовых облицовочных плиток, ограничивающих область расположения фланцев диагностики;
- необходимость расположения антенны в тени графитовых облицовочных плиток для защиты от нагрева со стороны плазмы из-за близкого расположения сепаратрисы;
- малое расстояние в вертикальном направлении для размещения антенны.

В качестве антенны со стороны сильного магнитного поля предполагается использовать пирамидальные рупора с отражателем на конце. При оптимизации параметров каждого из элементов антенны учитывалась предполагаемая технология изготовления (селективная лазерная плавка). Антенная система рассчитана на работу с волноводными линиями передачи на основе сверхразмерных прямоугольных волноводов с внутренним сечением  $23 \times 10$  мм. Полный размер антенны (три рупора) в тороидальном направлении составляет 164 мм, в вертикальном направлении 140 мм и в радиальном направлении 29 мм. Минимальная толщина стенки антенны составляет 2 мм. При разработке учитывалась возможная неточность размещения элементов антенной системы внутри вакуумной камеры  $\pm 1$  мм.

Каждый элемент антенной системы представляет собой комбинированный рупор, состоящий из оптимизированного волноводного перехода и интегрированного отражающего зеркала. Форма волноводного перехода оптимизирована для уменьшения потерь СВЧ-мощности с использованием соотношений, приведенных в работе [22]. Отражающее зеркало параболической формы рассчитано на работу с плоским фазовым фронтом на выходе из волноводного перехода и имеет фокус в центре вакуумной камеры. Расчетное распределение напряженности электрического поля в среднем сечении рупора приведено на рис. 12. Расчет выполнен для волноводной моды  $TE_{10}$ , соответствующей необыкновенной волне зондирующего излучения в плазме, на частоте 36.5 ГГц.

Видно, что оптимизированный переход формирует на выходе волну с плоским фазовым фронтом, которая отражается от зеркала под углом 90 градусов. Видимые искажения волнового фронта связаны с существенным влиянием волновых свойств при распространении волны в антенне с размерами, сопоставимыми с длиной волны. В данном случае длина волны составляла около 8 мм при максимальном поперечном размере перехода 25 мм.

Проведение измерений профиля электронной плотности со стороны сильного магнитного поля планируется в диапазоне частот зондирующего излучения от 8 до 60 ГГц. Для данного диапазона частот и поляризации, соответствующей необыкновенной волне в плазме, были рассчитаны диа-



**Рис. 7.** Общий вид волноводной линии и антенн диагностики “Рефлектометрия” в камере токамака Т-15МД. 1 – антенная система со стороны слабого магнитного поля, 2 – антенная система со стороны сильного магнитного поля, 3 – прямые волноводные секции линии передачи излучения на сторону сильного магнитного поля, 4 – поворот в волноводной линии передачи излучения на сторону сильного магнитного поля.

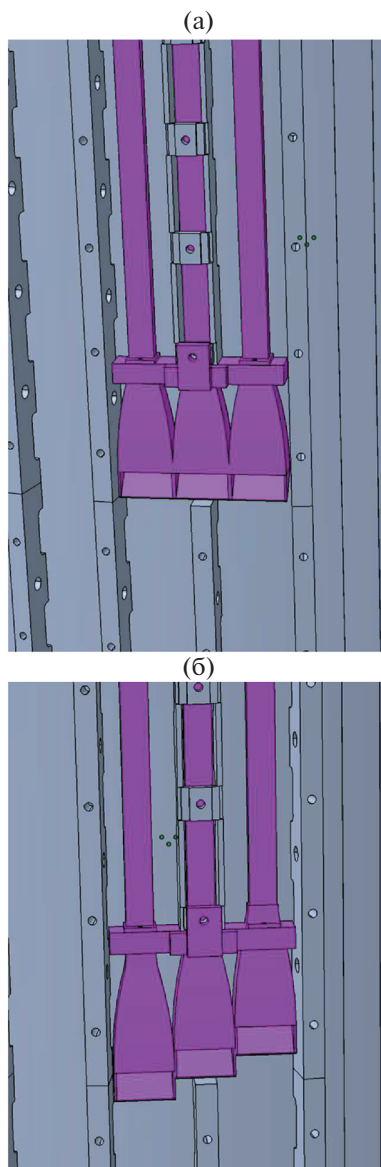
граммы направленности и основные параметры антенны (коэффициент усиления антенны, ширина основного лепестка, отклонение максимума диаграммы от нормали к апертуре антенны, уровень бокового лепестка). Расчеты проводились для частот от 10 до 60 ГГц с шагом 5 ГГц.

Пример диаграммы направленности на частоте 40 ГГц в полярных координатах (тороидальное и полоидальное сечение) приведен на рис. 13. Видно, что антенна хорошо формирует основной лепесток диаграммы. Кроме этого, в диаграмме присутствует боковой лепесток, связанный с ограниченными размерами антенны.

Расчетные параметры антенн как функция зондирующей частоты приведены на рис. 14. Расчеты показали, что антенна формирует основной лепесток с хорошей направленностью (отклонение от нормали к апертуре антенны не превышает 3 градусов). Ширина диаграммы направленности в основном определяется дифракционной расходимостью зондирующего пучка и не может быть уменьшена при заданных ограничениях на размеры антенной системы. Уровень бокового лепестка на низких частотах составляет не более –10 дБ. Для высоких частот уровень бокового лепестка увеличивается, при уменьшении ширины основного лепестка антенны. Таким образом полный размер области отражения существенно не изменяется.

### 3.2. Оптимизация волноводной траектории рефлектометра со стороны сильного магнитного поля

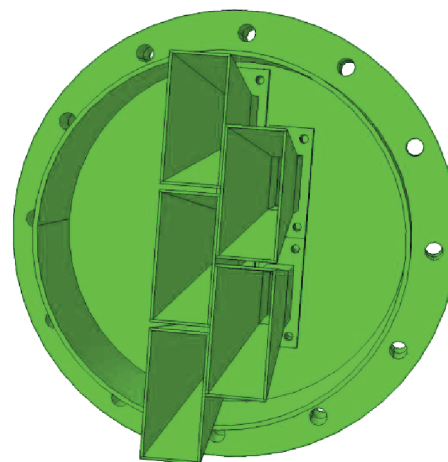
Для проведения измерений полного профиля электронной плотности (от центра шнура до периферии) требуется одновременная работа 3–4 рефлектометров в стандартных частотных диапазонах с совместным использованием одного приемно-передающего тракта и антенной системы. В частности, для измерения профиля электронной плотности со стороны сильного магнитного поля с использованием необыкновенной волны требуется частотный диапазон зондирующего излучения от 8 до 60 ГГц. Нижняя частота зондирующего излучения определяет выбор передающей линии – сверхразмерного прямоугольного волновода с внутренним сечением  $23 \times 10$  мм. Передающая линия диагностики должна работать в сверхширокополосном режиме, когда в волноводе может распространяться несколько мод и отклонения от прямой траектории волновода приводят к конверсии из основной рабочей моды  $TE_{10}$  в высшие волноводные моды [23]. Еще одной проблемой при создании передающей линии является необходимость размещения ее в узкой области между стенкой вакуумной камеры и внутрикамерными элементами токамака, такими как первая стенка и верхний дивертор, что суще-



**Рис. 8.** Размещение блока антенн рефлектометра со стороны сильного магнитного поля на в стенке вакуумной камеры Т-15МД. а) – антенна системы для измерения профиля плотности, б) – антенна для измерения параметров флуктуаций.

ственно снижает возможности для выбора траектории волновода.

Потери СВЧ-мощности на конверсию мод можно в существенной степени компенсировать использованием плавных поворотов специальной формы. В частности, в работе [24] было показано, что повороты с кривизной, меняющейся как гиперболический секант, обладают минимальными потерями по сравнению с другими формами поворота. Поскольку форма поворота содержит свободный параметр, возможна дополнительная оптимизация его формы с учетом



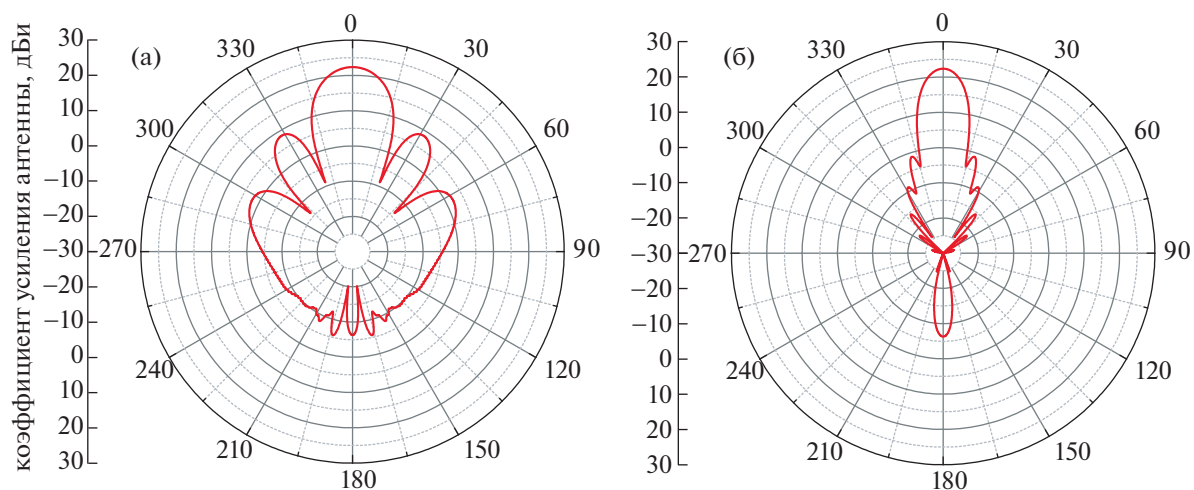
**Рис. 9.** Антенная система рефлектометрии со стороны слабого магнитного поля.

окружающей геометрии установки и конечной рабочей полосы частот.

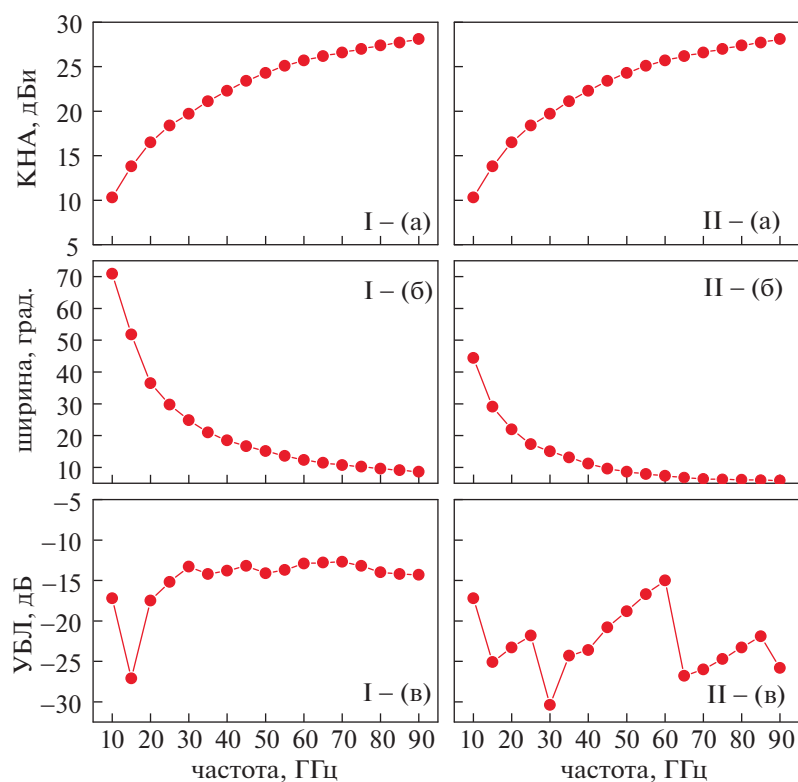
Для решения данной задачи использовался численный код расчета конверсии мод на основе метода поперечных сечений [23]. На каждом шаге код проводит проверку на возможность размещения волновода в существующем окружении токамака [25]. Поскольку предполагается, что в Т-15МД будут проводиться измерения интенсивности излучения на второй гармонике электронного циклотронного резонанса, с целью унификации волноводных трактов различных диагностик диапазон частот оптимизации был расширен до 200 ГГц как для волны  $TE_{10}$  (соответствует необыкновенной волне в плазме), так и для волны  $TE_{01}$  (соответствует обыкновенной волне в плазме).

На рис. 15 показаны потери СВЧ-мощности на конверсию мод для волноводных мод  $TE_{10}$  и  $TE_{01}$ . Для моды  $TE_{10}$  потери рассчитывались с частоты 18 ГГц, так как для меньших частот в волноводе данного типоразмера велики омические потери. Видно, что для оптимизированной траектории потери на конверсию мод не превышают 0.03 дБ, что существенно меньше омических потерь на длине волновода.

Поскольку планируется использование в диагностике волноводных трактов значительной длины (полная длина до 20 метров, включая внутрикамерную и атмосферную часть), была проведена оценка омических потерь СВЧ-мощности в тракте. При использовании медного волновода с внутренним сечением  $23 \times 10$  мм погонные потери СВЧ-мощности не превышают 0.1 дБ/метр для волн  $TE_{10}$  и 0.2 дБ/метр для волны  $TE_{01}$  в используемом диагностикой частотном диапазоне. Таким образом полные потери СВЧ-мощности в



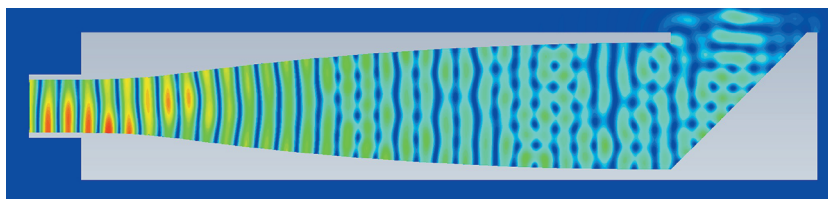
**Рис. 10.** Диаграмма направленности антенны рефлектометра со стороны слабого магнитного поля на частоте 40 ГГц в тороидальной плоскости (а) и полоoidalной плоскости (б). Ноль соответствует нормали к апертуре антенны. Расчеты выполнены для волноводной моды  $TE_{10}$ , соответствующей обыкновенной волне зондирующего излучения.



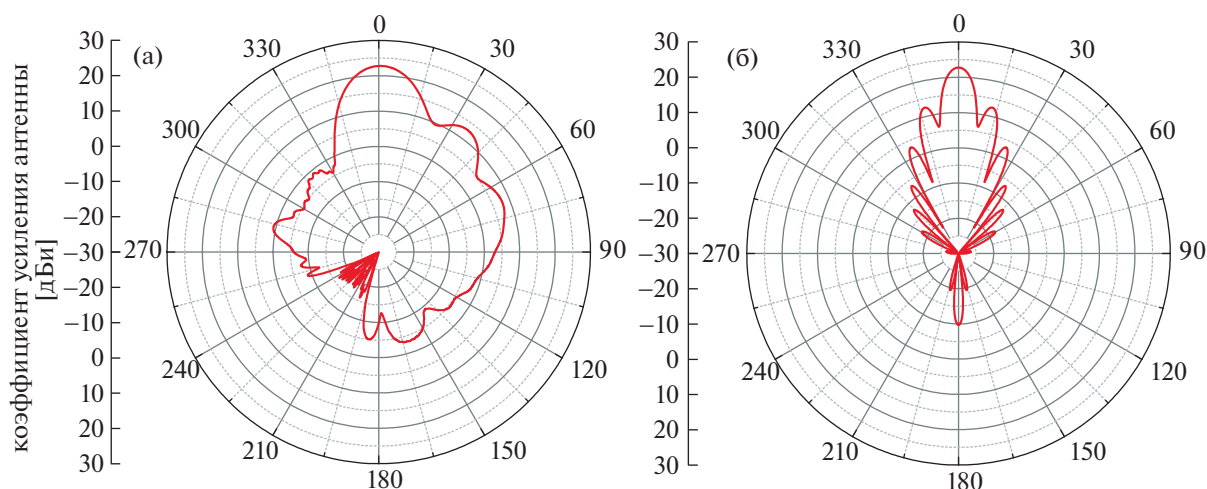
**Рис. 11.** Основные параметры антенной системы рефлектометра со стороны слабого магнитного поля. I – параметры антенны в тороидальном сечении, II – параметры антенны в полоoidalном сечении. а) – коэффициент направленности антенны; б) – ширина основного лепестка (по уровню – 3дБ); в) – уровень бокового лепестка. Расчеты выполнены для волноводной моды  $TE_{10}$ , соответствующей обыкновенной волне зондирующего излучения.

волноводном тракте не превышают 4–5 дБ. Для сравнения, полные потери СВЧ-мощности в трактах рефлектометра на установке Т-10 состав-

ляли 5–7 дБ (до 10 метров волновода сечением  $7.2 \times 3.4$  мм). Геометрические размеры антенн и плазмы на установках Т-10 и Т-15МД близки, по-



**Рис. 12.** Распределение напряженности электрического поля в средней плоскости антенны на частоте 36.5 ГГц. Расчеты выполнены для волноводной моды  $TE_{10}$ , соответствующей необыкновенной волне зондирующего излучения.



**Рис. 13.** Диаграмма направленности антенны рефлектометра со стороны сильного магнитного поля на частоте 40 ГГц в полюидальной плоскости (а) и тороидальной плоскости (б). Ноль соответствует нормали к апертуре антенны. Расчеты выполнены для волноводной моды  $TE_{10}$ , соответствующей необыкновенной волне зондирующего излучения.

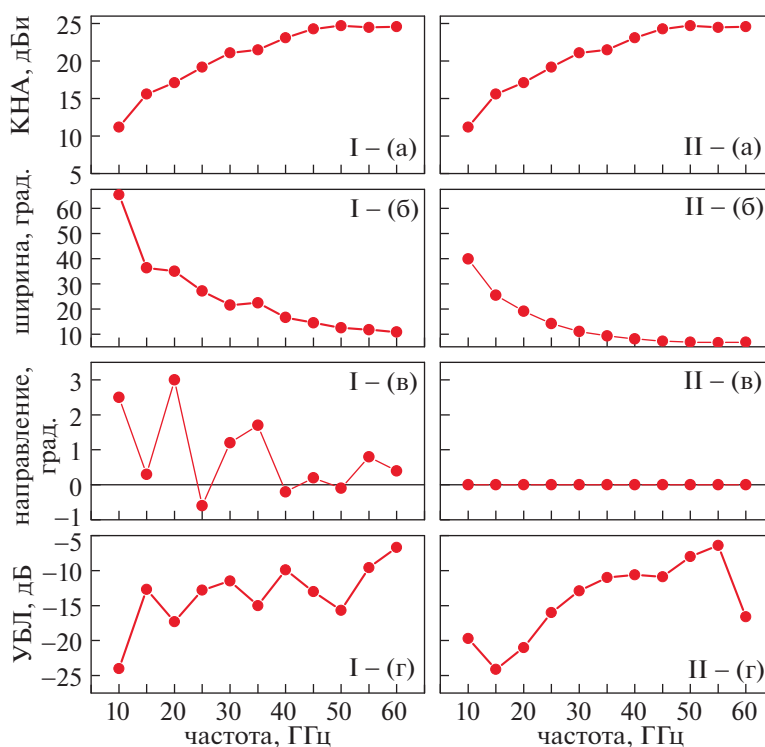
этому можно ожидать близкие значения связи антенн на обеих установках (около  $-20$ – $30$  дБ). Для рефлектометров планируется использовать одинаковое приемно-передающее оборудование с мощностью СВЧ-источников в диапазоне  $15$ – $25$  дБм. Поэтому можно ожидать, что соотношение сигнал-шум для рефлектометров на установке Т-15МД будет близко к наблюдававшемуся для рефлектометров на установке Т-10. Принимая полную мощность потерь СВЧ-излучения в тракте и СВЧ-элементах на уровне  $10$  дБ, связь антенн  $-30$  дБ и мощность СВЧ-источников равной  $20$  дБм, можно оценить мощность СВЧ-сигнала на приемном миксере. Эта мощность составляет около  $-20$  дБм, что соответствует среднеквадратичной амплитуде сигнала с миксера около  $22$  мВ (на нагрузку  $50$  Ом).

Уровень шумов приемного миксера определяется его шумовой температурой и потерями на преобразование. Для современных миксеров (например серия СВЧ-миксеров SpacekLabs M-1 или Millitech Inc. MXP) шумовая температура составляет  $4$ – $5$  К, а потери на преобразования около  $6$ – $7$  дБ. С учетом требуемой эффективной полосы

сигнала  $200$  МГц (см. раздел 4) уровень теплового шума миксера будет составлять около  $-80$  дБм. Таким образом, ожидаемое соотношение сигнал-шум рефлектометров для измерения профиля электронной плотности составит около  $60$  дБ. Считается, что проведение измерений профиля плотности можно уверенно проводить при соотношении сигнал-шум  $30$  дБ и выше, что дает для рефлектометра Т-15МД запас по мощности сигнала около  $30$  дБ.

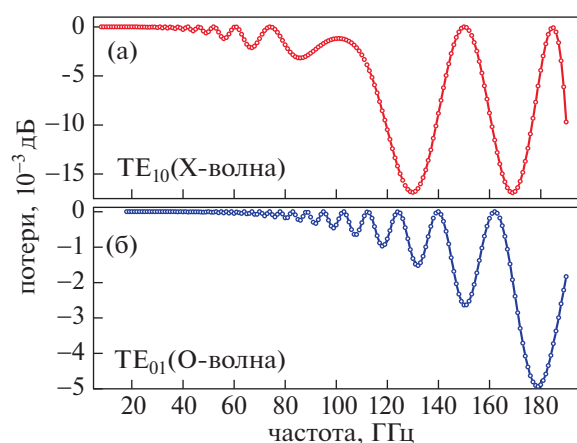
### 3.3. Размещение оборудования в зале установки Т-15МД

Как следует из табл. 2 для проведения полноценных измерений требуется совместное использование волноводных и антенных систем несколькими рефлектометрами. Для решения задачи объединения и разделения частотных диапазонов предполагается использовать специальные устройства – системы сложения или каплеры (англ. couplers). В рамках работ по созданию диагностики для установки ИТЭР был разработан и изготовлен макет такого устройства для 5 диапазонов частот от  $12$  до  $90$  ГГц [26]. Габаритные



**Рис. 14.** Основные параметры антенной системы рефлектометра со стороны сильного магнитного поля. I – параметры антенны в полоидальном сечении, II – параметры антенны в тороидальном сечении. а) – коэффициент направленно-сти антенны, б) – ширина основного лепестка (по уровню – 3дБ), в) отклонение основного лепестка от нормали к апертуре антенны, г) уровень бокового лепестка. Расчеты выполнены для волноводной моды  $TE_{10}$ , соответствующей необыкновенной волне зондирующего излучения.

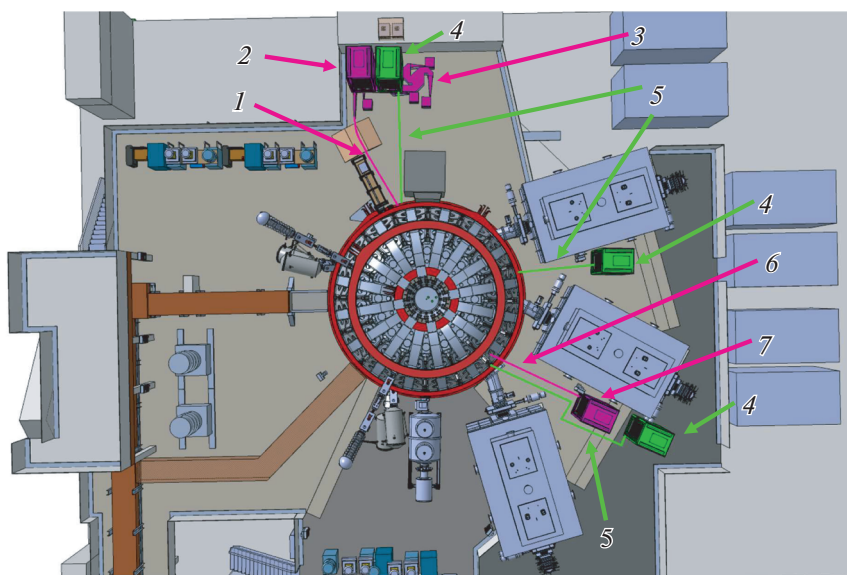
размеры системы составляют  $2500 \times 2000 \times 200$  мм. Такую систему можно разместить на антресоли I уровня в области I порта, что позволит сделать короткую волноводную линию до входа в уста-



**Рис. 15.** Потери на конверсию мод для оптимизированного волноводного поворота СВЧ-диагностики токамака Т-15МД, размещенных на стороне сильного магнитного поля. а) – волноводная мода  $TE_{10}$ , б) – волноводная мода  $TE_{01}$ .

новку и обеспечить измерения со стороны сильного магнитного поля во 2 диагностическом порту. Для обеспечения измерений со стороны сильного магнитного поля в 12 порту на антресоли I уровня пространство оказывается ограничено инжекторами системы нагрева пучками нейтральных частиц (Neutral Beam Injection, NBI). Альтернативой является размещение системы на I этаже зала токамака, требующее интеграции оборудования рефлектометрии с оборудованием, обеспечивающим работу нагревных пучков.

Приемное и управляющее оборудование будет устанавливаться в электрические шкафы размером  $800 \times 800 \times 2300$  мм. В шкафах будут смонтированы коммуникационные модули диагностики, управляющие системы, определяющие режимы работы диагностики, модули питания, АЦП и квадратурные детекторы. Размещенное в шкафах оборудование будет связываться с компьютерами операторов диагностики по сети Ethernet. Управление рефлектометрией предполагается осуществлять из общей удаленной пультовой установки Т-15МД. Предполагаемая схема размещения оборудования на установке представлена на рис. 16.



**Рис. 16.** Размещение элементов диагностики “Рефлектометрия” в зале установки Т-15МД. Рефлектометр со стороны сильного магнитного поля для измерения профиля электронной плотности (сечение 2): 1 – волноводная линия передачи излучения, 2 – шкаф с активным оборудованием, 3 – система сложения СВЧ-излучения. Рефлектометры со стороны слабого магнитного поля для измерения параметров флуктуаций плазмы (сечения 2, 12 и 14): 4 – шкаф с активным оборудованием; 5 – коаксиальная линия передачи излучения. Рефлектометр со стороны сильного магнитного поля для измерения параметров флуктуаций плазмы (сечение 14): 6 – коаксиальная линия передачи излучения; 7 – шкаф с активным оборудованием.

#### 4. АКТИВНОЕ ДИАГНОСТИЧЕСКОЕ ОБОРУДОВАНИЕ

В настоящий момент можно выделить три основных типа используемых СВЧ-источников и две схемы формирования опорного сигнала гетеродина в рефлектометрах. В качестве источников СВЧ-излучения используются полупроводниковые СВЧ-генераторы, управляемые напряжением (ГУН, в англоязычной литературе Voltage Controlled Oscillator – VCO) [6–10], синтезаторы частоты [27] либо осцилляторы на основе иттрий-алюминиевых гранатов (ИАГ) [28]. Для формирования гетеродинного сигнала используются либо цепи обратных связей с фазовой подстройкой частоты [6, 20], либо миксеры с подавлением несущей и боковой полосы – (МПНБ, Single Side Band Mixer – SSBM) [29].

С учетом опыта, полученного при создании рефлектометрии ИТЭР со стороны сильного магнитного поля, предлагается использовать на установке Т-15МД схемотехнику, аналогичную предлагаемой для ИТЭР (рис. 17). В рамках этих работ созданы и успешно испытаны на установке Т-10 рефлектометры для измерения профиля электронной плотности и мелкомасштабных флуктуаций [10].

Рефлектометр будет иметь модульную конструкцию, что даст возможность унификации отдельных частей и позволит гибко размещать оборудование в зале установки Т-15МД. Основные

модули включают управляющий генератор 1, задающий частоту СВЧ-источника, активные СВЧ-излучатель 2 и приемник 3, а также линию для калибровки частоты задающего СВЧ-генератора 4 и систему сбора данных 5. Все компоненты соединены между собой коаксиальными кабелями для обеспечения гибкости при размещении на установке.

Управляющий генератор 1 служит для генерации СВЧ-сигнала в области частот от 8 до 20 ГГц. Блок управления 6 служит для связи генератора 1 с пультом удаленного управления на рабочей станции оператора диагностики 29 через стандартные сети обмена данных установки 27. Оператор задает временную зависимость изменения частоты генератора с помощью программирования быстрого 16-разрядного цифро-аналогового преобразователя (ЦАП) 7. Полученное управляющее напряжение усиливается до необходимых значений малошумящим усилителем постоянного напряжения 8 до напряжения в диапазоне 0–20 В и подается на управляющий вход СВЧ ГУН 9. В качестве источников СВЧ-излучения предлагается использовать широкополосные ГУН в диапазоне частот  $F$  8–20 ГГц. Далее часть сигнала с ГУН направляется на миксер с подавлением несущей и боковой полосы 12. На вход промежуточной частоты (intermediate frequency – IF) подается сигнал с высокочастотного (ВЧ) генератора для формирования измерительного СВЧ-сигнала,





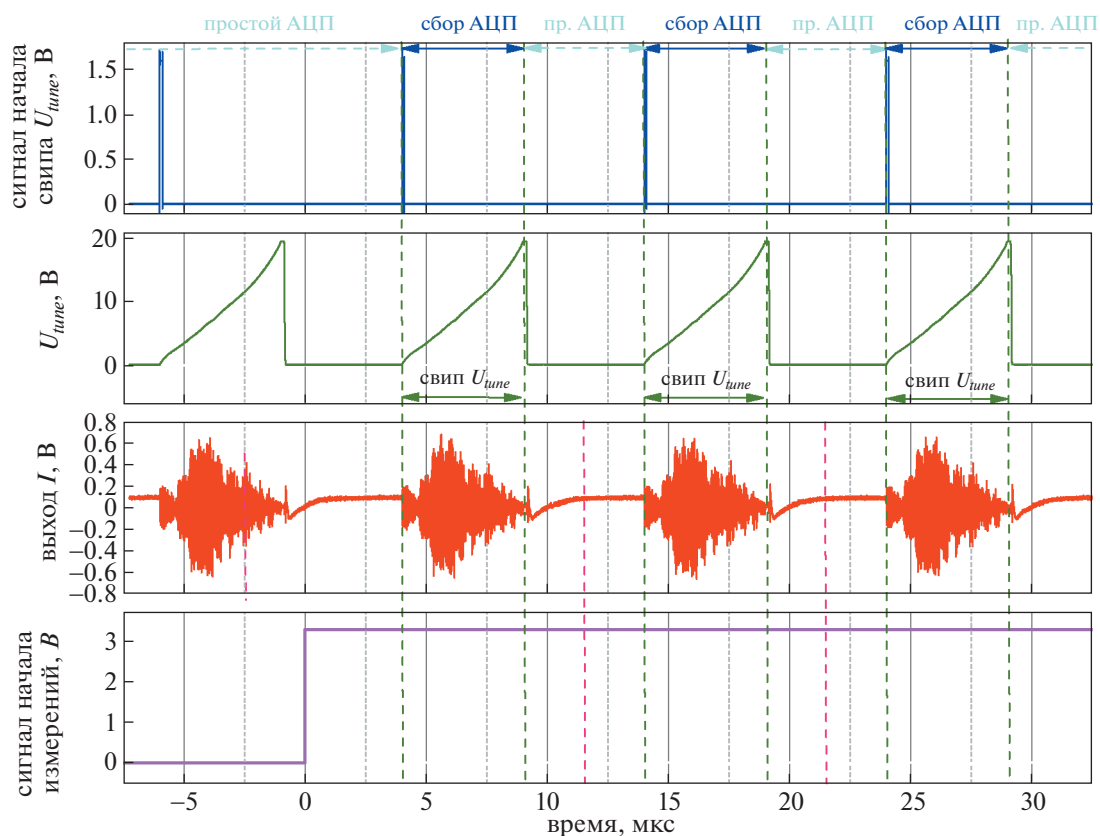


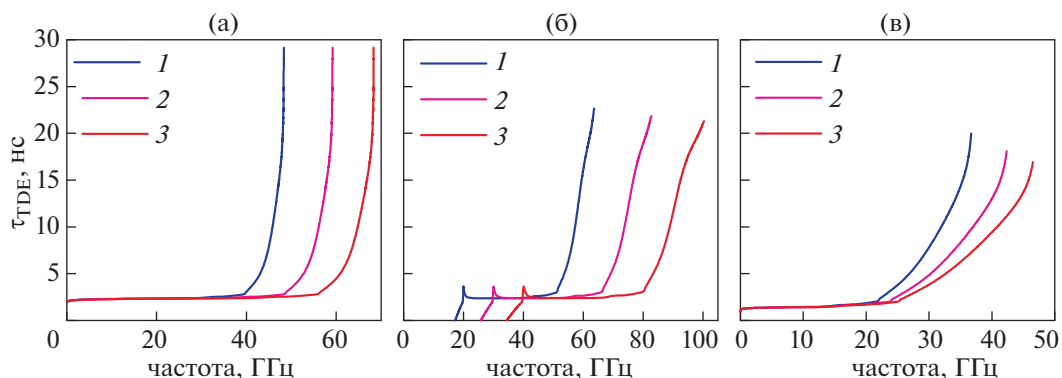
Рис. 18. Циклограмма работы рефлектометра в режиме измерения профиля электронной плотности.

Одной из проблем при использовании ГУН типа VCO является существенная вариация крутизны характеристики  $dF/dU$  (производной выходной частоты  $F$  от управляющего напряжения  $U = U_{tune}$ ) в зависимости от частоты ГУН  $F$ . Вариация  $dF/dU$  для VCO может достигать шести раз по частотному диапазону. Поскольку для измерения профиля электронной плотности требуется линейное измерение частоты во времени, то перед проведением измерений необходимо точное измерение характеристики  $dF/dU$  как функции  $U_{tune}$  и программирование вариации во времени  $U_{tune}$ , которая обеспечивает линейную вариацию частоты. Для этих целей в состав рефлектометра включена линия калибровки 5. Часть сигнала ГУН направляется на линию калибровки, где, после коаксиального СВЧ-усилителя 22 разделяется на опорный и измерительный канал. Сигнал опорного канала через коаксиальный изолятор 15 поступает на вход LO коаксиального миксера 23. Сигнал измерительного канала проходит через СВЧ-переключатель 21 и линию задержки 14, после чего через коаксиальный изолятор 15 поступает на вход RF коаксиального миксера 23. Полученный сигнал биений регистрируется АЦП в составе системы сбора. Методика восстановления

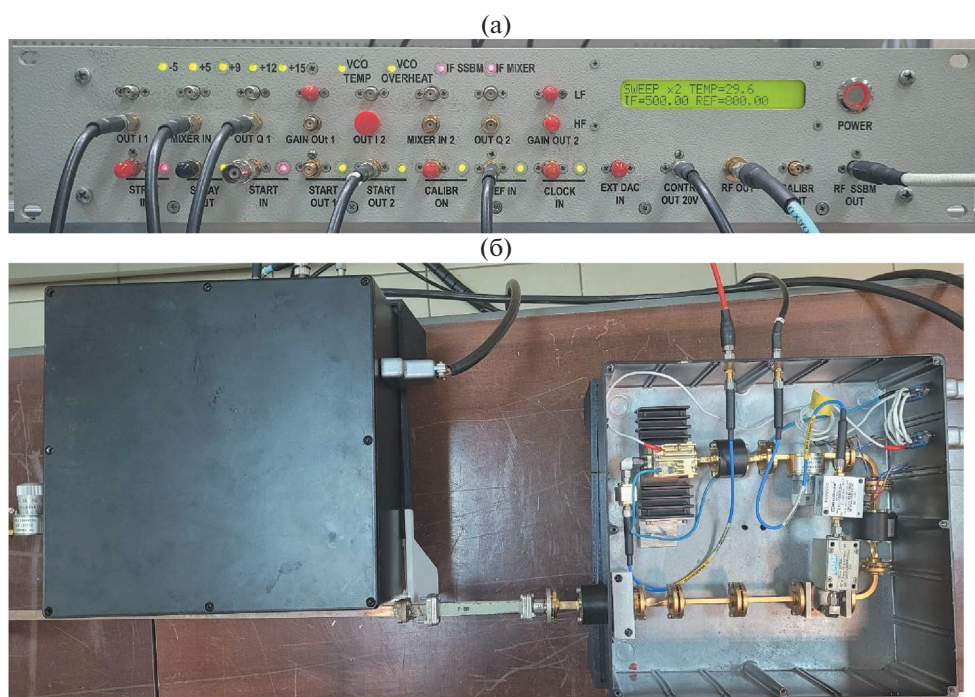
характеристики  $dF/dU(U)$  по сигналу частоты биений описана в [10].

Типичная циклограмма работы диагностики в режиме измерения профиля электронной плотности плазмы показана на рис. 18. Модуль синхронизации 25 вырабатывает стартовые импульсы для АЦП 26 и системы управления рефлектометром 1 со скважностью 10 мкс. По приходу команды старта ЦАП 7 вырабатывает управляющее напряжение, обеспечивающее линейное измерение частоты ГУН во времени в течение 5 мксек. Принятый сигнал проходит кондиционирование через СВЧ-миксер 18 и квадратурный детектор 13 и поступает на вход АЦП 26. АЦП 26 работает в оконном режиме с условным запуском, то есть начинает сбор по приходу сигнала старта сканирования частоты *после* сигнала начала рабочего импульса. Такая реализация позволяет собирать данные только на активной фазе измерений (при линейном изменении частоты), что существенно экономит ресурсы локальной памяти АЦП.

Выбор АЦП для измерения профиля электронной плотности плазмы определяется ожида-



**Рис. 19.** Величины задержек для различных сценариев использования рефлектометров. 1 – тороидальное поле  $B_T = 1.0$  Т; 2 – тороидальное поле  $B_T = 1.5$  Т; 3 – тороидальное поле  $B_T = 2.0$  Т. а) – рефлектометр на обыкновенной волне, зондирование со стороны слабого магнитного поля; б) – рефлектометр на верхней отсечке необыкновенной волны, зондирование со стороны слабого магнитного поля; в) – рефлектометр на нижней отсечке необыкновенной волны, зондирование со стороны сильного магнитного поля.



**Рис. 20.** Макеты СВЧ-компонентов диагностики. а) – макет задающего СВЧ-генератора; б) – макет модулей излучения (слева) и приема (справа, верхняя крышка снята).

емым диапазоном частоты биений сигнала рефлектометра  $f_{beat}$ :

$$f_{beat} = dF/dt \cdot \tau_{TFD},$$

где  $dF/dt$  – скорость свипирования частоты рефлектометра,  $\tau_{TFD}$  – время распространения сигнала до отсечки и обратно. Формально  $\tau_{TFD}$  должна также включать время распространения сигнала по линиям передачи до антенны и обратно, однако эта задержка может быть скомпенсирована применением коаксиальной линии задержки 14 в опорном плече рефлектометра. Характер-

ные времена задержки для различных сценариев разряда приведены на рис. 19.

Максимальные частоты биений  $f_{beat}$  при использовании стандартных частотных диапазонов составляют:

- 120 МГц при использовании зондирования со стороны слабого магнитного поля на обыкновенной волне;
- 200 МГц при использовании зондирования со стороны слабого магнитного поля на необыкновенной волне и верхней отсечки;

• 60 МГц при использовании зондирования со стороны слабого магнитного поля на необыкновенной волне и нижней отсечки.

Таким образом, полоса пропускания АЦП должна составлять не менее 200 МГц, частота сбора данных – не менее 400 МВыборок/с. Полученные частоты биений также накладывают ограничения на промежуточную частоту гетеродинного рефлектометра  $f_{IF}$ , поскольку она должна существенно превышать частоту биений  $f_{beat}$ . Удобно использовать частоту биений 1 ГГц, поскольку прототипы соответствующего оборудования уже были разработаны в рамках работ по созданию рефлектометра для установки ИТЭР и опробованы в плазменном эксперименте на установке Т-10 (рис. 20) [10].

В качестве системы сбора данных возможно применение АЦП National Instruments (NI) PXIe-5153 (для сканирующей системы) и NI PXIe-5153 (для исследования параметров турбулентностей). Система PXIe-5153 имеет полосу регистрации 500 МГц и потоковую скорость до 2 ГВыборок/с. Он позволяет записывать до 60000 сканов длиной 5 мкс. Для исследований турбулентностей предлагается использовать PXIe-5153 с полосой 10 МГц и потоковой скоростью 10 МВыборок/с.

## 5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе проведен анализ физических и инженерных возможностей для реализации диагностики рефлектометрия на установке Т15МД. Анализ показал, что оптимальным вариантом при реализации рефлектометрии для измерения профиля плотности является использование зондирования со стороны сильного магнитного поля и отражения от нижней отсечки необыкновенной волны в диапазоне частот от 8 до 60 ГГц. Для измерения параметров флуктуаций может использоваться рефлектометрия со стороны слабого магнитного поля с отражением от отсечки обыкновенной волны в диапазоне частот от 12 до 60 ГГц.

Для измерения флуктуаций плазмы с помощью рефлектометрии планируется использовать унифицированные антенные сборки, состоящие из пяти пирамидальных рупоров (один излучающий – четыре приемных), размещенные в нескольких сечениях установки Т-15МД. Для антенн со стороны сильного магнитного поля будут использованы рупорные антенны с интегрированным отражателем. Расчеты показывают, что такие антенны имеют хорошую направленность, а уровень бокового лепестка в основной рабочей области частот не превышает –10 дБ. Форма поворота во внутрикамерной части волноводного тракта была оптимизирована для снижения потерь на конверсию мод.

В качестве приемно-передающего оборудования предлагается использовать опробованные ранее на Т-10 СВЧ-генераторы на основе ГУН с активными умножителями частоты. Выполненная оценка характерных частот биений при работе рефлектометра в режиме FMCW показывает, что частоты не будут превышать 200 МГц. Это позволяет использовать оборудование, разработанное для рефлектометров установки ИТЭР с промежуточной частотой 1 ГГц и АЦП, использовавшиеся для рефлектометров Т-10. Работа выполнена в рамках федерального проекта “Разработка технологий управляемого термоядерного синтеза и инновационных плазменных технологий” (приказ НИЦ “Курчатовский институт” от 31 декабря 2020 года № 2996).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Арцимович Л.А., Сагдеев Р.З. Физика плазмы для физиков. М.: Атомиздат, 2079.
2. Zweben S.J., Taylor R.J. // Nucl. Fusion. 2018. V. 22. № 2. P. 203.
3. Paul S.F., Fonk R.J. // Rev. Sci. Instr. 2009. V. 61. № 11. P. 3496.
4. Melnikov A.V., Krupnik L.I., Eliseev L.G., Barcala J.M., Bravo A., Chmyga A.A., Deshko G.N., Drabinskij M.A., Hidalgo C., Khabanov P.O. // Nucl. Fusion. 2017. V. 57. 072104.
5. Costley A.E., Cripwell P., Pretince R., Sips A.C.C. // Rev. Sci. Instrum. 1990. V. 61. № 10. P. 2924.
6. Silva A., Manso M.E., Cupido L., Albrecht M., Serra F., Varela P., Santos J., Vergamota S., Eusébio F., Fernandes J., Grossmann T., Kallenbach A., Kurzan B., Loureiro C., Meneses L., Nunes I., Silva F., Suttrop W., and the ASDEX Upgrade Team // Rev. Sci. Instrum. 1996. V. 67. № 12. P. 4138
7. Zeng L., Wang G., Doyle E.J., Rhodes T.L., Peebles W.A., Peng Q. // Nucl. Fusion. 2006. V. 46. S677–S684
8. Meneses L., Cupido L., Sirinelli A., Manso M.E. and JET EFDA contributors // Rev. Sci. Instrum. 2008. V. 79. № 10. 10F108.
9. Clairet F., Bottereau, C. Chareau J.M., Sabot R. // Rev. Sci. Instrum. 2003. V. 7. № 3. P. 1481.
10. Shelukhin D.A., Vershkov V.A., Subbotin G.F., Sarychev D.V., Petrov A.A., Petrov V.G., Sokolov M.M., Igonkina G.B. // Rev. Sci. Instrum. 2018. V. 8. 094708 <https://doi.org/10.1063/1.5039151>
11. Simonet F. // Review of Scientific Instruments. 1985. V. 56. P. 664.
12. Petrov A.A., Petrov V.G. // Rev. Sci. Instrum. 2003. V. 74. P. 1465.
13. Heald M.A., Wharton C.B. Plasma diagnostics with microwaves. John Wiley & Sons Inc, New York-London-Sydney, 1998
14. Mazzucato E. // Phys. Fluids. 1992. B. P. 3460.
15. Appleton E.V.J. // Inst. Electr. Engrs (London). 1932. V. 71. 642
16. Azizov E.A., Belyakov V.A., Filatov O.G., Velikhov E.P. and T-15MD Team // 24rd IAEA Fusion Energy Conf.

- (FEC 2010). Daejon, Korea Rep., 11–16 October 2010, FTP/P6-01
17. *Леонов В.М.* // ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез. 2016. Т. 39. Вып. 3. С. 73.
  18. *Kislov D.A.* // Nucl. Fusion. 2007. V. 47. S590
  19. *Nikolaeva V., Guimaraes L., Manz P., Carralero D., Manso M.E., Stroth U., Silva C., Conway G.D., Seliu-nin E., Vicente J., Brida D., Aguiam D., Santos J., Silva A.* and ASDEX Upgrade team and MST team// Plasma Physics and Controlled Fusion. 2018. V. 60. № 5.  
<https://doi.org/10.1088/1361-6587/aab4c5>
  20. ГОСТ 22000-75\* Трубы волноводные медные и латунные прямоугольные. Технические условия
  21. *Климов К., Годин А., Перфильев В.М.* LAMBERT Academic Publ., 2012
  22. *Mett R.R., Sidabras J.W., Anderson J.R., Hyde J.S.* // Review of Scientific Instruments. 2011. V. 82. 074704.  
<https://doi.org/10.1063/1.3607432>
  23. *Katsenelenbaum B.Z., Mercader Del Rio L., Pereyaslavets M., Sorolla Ayza M., Thumm M.* Electromagnetic Waves Series, 1998
  24. *Doane J.L.* // Microwave Theory and Techniques. 1984. V. 32. № 10. P. 1362.
  25. *Novokshenov A., Nemov A., Shelukhin D., Lukyanov V., Gorbunov A., Vershkov V.* // Fusion Engineering and Design. 2021. V. 168. 112506.  
<https://doi.org/10.1016/j.fusengdes.2122.112506>
  26. *Belousov V.I., Vershkov V.A., Denisov G.G., Khozin M.A., Shelukhin D.A.* // Technical Physics Letters. 2017. V. 43. № 11. P. 1037.
  27. *Tokuzawa T., Ejiri A., and K* // Review of Scientific Instruments. 2010. V. 81. 10D906  
<https://doi.org/10.1063/1.3478747>
  28. *Soldatov S., Krämer-Flecken A., Zorenko O.* // Review of Scientific Instruments. 2011. V. 82. 033513.  
<https://doi.org/10.1063/1.3567779>
  29. *Sabot R., Bottureau C., Chareau J.-M., Clairet F., Pau-me M.* // Rev. Sci. Instrum. 2004. V. 75. № 8. P. 2756.