

УДК 533.6

СИСТЕМА ИЦР-НАГРЕВА ПЛАЗМЫ TRT

© 2021 г. В. М. Баев^а, Д. В. Гетман^а, А. М. Губин^{а, *}, М. Л. Субботин^б^а Научно-исследовательский институт электрофизической аппаратуры им. Д.В. Ефремова (НИИЭФА), Санкт Петербург, Россия^б Национальный исследовательский центр “Курчатовский институт”, Москва, Россия

*e-mail: gubin@sintez.niiefa.spb.su

Поступила в редакцию 28.05.2021 г.

После доработки 20.06.2021 г.

Принята к публикации 20.07.2021 г.

Представлена система ИЦР-нагрева (ИЦРН) плазмы токамака TRT. Токамак TRT разрабатывается как плазменный прототип чистого термоядерного реактора и термоядерного источника нейтронов для гибридного (синтез-деление) реактора. Приведен состав системы ИЦРН-плазмы, установленная ВЧ-мощность системы 6 МВт в рабочем диапазоне частот 60–80 МГц, максимальная мощность ВЧ-генераторов 2 МВт в рабочем диапазоне частот с длительностью ВЧ-импульса $t_{\text{ВЧ}} = 100$ с.

Ключевые слова: ИЦРН, ВЧ-генератор, антенна, система согласования

DOI: 10.31857/S0367292121120015

1. ВВЕДЕНИЕ

Нагрев на частотах ионно-циклотронного диапазона частот (ИЦР) является важным дополнительным методом нагрева плазмы в токамаках, на ИТЭР он является одним из методов нагрева термоядерных ионов, для ускорения реакции термоядерного синтеза и поддержания термоядерного горения. ИЦРН имеет некоторые явные преимущества перед другими системами нагрева: быстрые магнитозвуковые волны (БМЗ) могут легко проникать в плазму и сильно поглощаться. Промышленные ВЧ-генераторы доступны, недороги и надежны.

Впервые работы по ионно-циклотронному нагреву плазмы в токамаках были выполнены в СССР в 1970–1976 гг. на установке токамак ТМ1-ВЧ. На этом токамаке были осуществлены успешные эксперименты с ионно-циклотронным нагревом плазмы (БМЗ-моды), в которых был открыт эффект нагрева малой добавки резонансных ионов, также на этом токамаке были исследованы сценарии ион-ионного резонанса и на второй гармонике ионов [1–3]. После успешных исследований ионно-циклотронного нагрева плазмы на токамаке ТМ1-ВЧ ионно-циклотронный нагрев в качестве основного механизма нагрева плазмы был использован на средних (Т-10, РЛТ, ТЕХТОР, ASDEX, Alcator C-Mod) и больших (TFTR, JET, JT-60U, TS) токамаках. Параметры современных токамаков и систем ионно-циклотронного резонансного нагрева приведены в [4].

ВЧ-генератор для ИЦР-нагрева обычно представляет собой систему с тетродными вакуумными лампами мегаваттного уровня в качестве конечного каскада усилителя мощности, работающего в диапазоне десятков МГц. Выходное сопротивление генератора и характеристическое сопротивление линий передач обычно составляют 30 Ом или 50 Ом. ВЧ-мощность генератора подается по передающей линии на ИЦР-антенну, находящуюся внутри вакуумной камеры токамака. Антенна, по существу, представляет собой набор излучающих петель, расположенных физически достаточно близко к плазме, и имеет довольно малую нагрузку порядка 0.1–10 Ом. Нагрузка на антенну изменяется (иногда быстро) в ответ на изменения в пристеночной плазме вблизи плотности отсечки БМЗ. Поэтому требуется система согласования импеданса между ВЧ-генератором и антенной, чтобы в идеале ВЧ-генератор выдавал радиочастотную мощность на эквивалентно согласованную нагрузку. Поддержание согласования антенны при изменяющейся (особенно быстрой и переходной) плазменной нагрузке остается важной, но еще не полностью решенной технической проблемой для ИЦР-нагрева.

На разных токамаках было разработано множество типов согласующих систем. Традиционный подход заключается в использовании шлейфов и фазовращателей (растяжителей линий — тромбонов), которые имеют механически изменяемую длину. Эти системы обычно медленны и не предназначены для применения при измене-

нии параметров плазменного разряда для работы с высокой ВЧ-мощностью. В результате, если плазменная нагрузка быстро меняется или изменяется в большом диапазоне, ВЧ-генератор будет несогласован. Для изоляции ВЧ-генераторов от отраженной мощности на JET [5] и ASDEX Upgrade [6] успешно внедрена система с использованием гибридных 3dB-делителей мощности. Многие рабочие группы на токамаках изучили и внедрили согласующие системы, которые могут быть использованы в режиме реального времени, включая внутреннюю T-сопряженную систему согласования на WEST [7] и для ИТЭР-подобной антенны на JET [5], внешнюю T-сопряженную систему согласования импеданса на JET [8, 9], диэлектрические жидкие шлейфы на EAST [10] и LHD [11], ферритовые тюнеры на Alcator C-Mod [12, 13], EAST [14] и KSTAR [15].

2. ИЦР-НАГРЕВ ПЛАЗМЫ НА TRT

Нагрев плазмы в TRT с помощью излучения волн ионного циклотронного диапазона частот был выбран в качестве одного из методов дополнительного нагрева.

Система ИЦРН TRT будет работать в диапазоне частот 60–80 МГц с k_{\parallel} в диапазоне 8–13 м⁻¹. При работе TRT с тороидальным магнитным полем 8 Тл выбранный диапазон частот ИЦ включает приосевые циклотронные резонансы: фундаментальный для ионов малой добавки ³He и вторую гармонику для T на 80 МГц, приосевой и находящийся в центральной части плазменного шнура резонансы для добавки дейтерия в дейтериево-третиевой ДТ-плазме и для добавки ⁹Be, соответственно, при 60 МГц [16].

Параметры системы ИЦРН TRT

- рабочий диапазон частот, 60–80 МГц;
- полная ВЧ-мощность, не менее 6 МВт;
- длительность ВЧ-импульса, не менее 100 с.

Состав системы ИЦРН на токамаке TRT

- антенна с набором излучающих петель и экраном Фарадея;
- вакуумные передающие линии, включая узел керамического проходного изолятора;
- система вакуумной откачки;
- система согласования импеданса, состоящая из передающих линий, согласующих элементов, диагностического оборудования;
- ВЧ-генераторы;
- источник питания ВЧ-генераторов;
- система охлаждения ВЧ-генераторов и источников питания;

– система управления, согласования, диагностики, сбора и обработки информации.

Система согласования импеданса

Во время работы TRT в режиме H-моды система ИЦРН должна обеспечивать эффективное согласование нагрузки антенны во время индуцированных колебаний на границе плазменного шнура (ELM) с выходным сопротивлением ВЧ-генератора.

Эту сложнейшую проблему можно будет разрешить с помощью использования системы с гибридными 3dB-разделителями (3dB hybrid couplers system), внешней T-сопряженной системой согласования импеданса (External Conjugate-T (ECT) impedance matching system) или быстрой ферритовой настройки в реальном времени (Fast Ferrite Tuners – FFT).

Система с использованием гибридных 3dB-разделителей на JET представлена и описана в [5]. Гибридные 3dB-разделители установлены для деления мощности от генераторов пополам между аналогичными петлями двух антенн A2 JET и представляют собой четырехпортовые квадратные четвертьволновые мосты, которые имеют свойство изолировать генераторы от отраженной мощности, приходящей обратно от петель антенн, относительная фаза между падающими напряжениями в двух выходных портах составляет 90°. Если изменение в нагрузке во время ELMов приводит к идентичному изменению в импедансе для двух выводов портов разветвителя, отраженная мощность пойдет в согласованную эквивалентную нагрузку вместо того, чтобы идти в выходную передающую линию ВЧ-генератора, не допуская срабатывания системы защиты генератора. Необходимо, чтобы два произвольных импеданса и их изменения были идентичными, для этого требуется низкая взаимная индуктивность, поэтому петли антенн должны быть достаточно далеко друг от друга или, например, разделены перегородкой.

Внешняя система T-сопряжения согласования импеданса, примененная на JET, подробно представлена в [9], ее работа основывается на принципе настраиваемого параллельного резонанса, активные нагрузки включены в обе ветви цепей, и реактивы имеют равные абсолютные значения. Коэффициент стоячей волны (КСВ) близок к единице в широком диапазоне сопротивления нагрузки. Это поведение объясняет высокую устойчивость схемы T-сопряжения к ELMам.

В системе ИЦРН, основанной на принципе T-сопряжения, соответствующие токопроводящие петли принадлежат разным ИЦР-антеннам, они спарены для того, чтобы сформировать комплексные сопряженные импедансы на коакси-

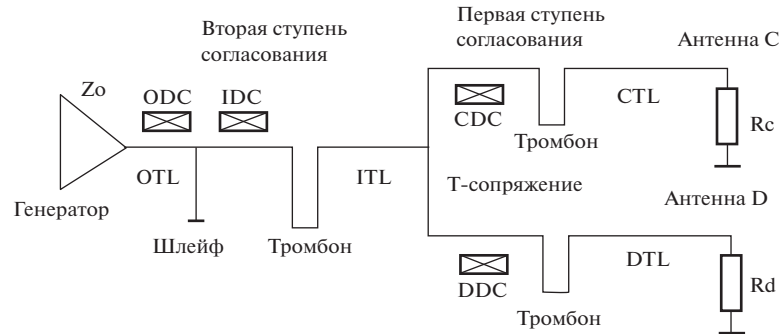


Рис. 1. Обобщенная схема согласования на основе принципа Т-сопряжения, внедренная на JET, где OTL, ITL, CTL, DTL – передающие линии, ODC, IDC, CDC, DDC – диагностические направленные ответвители.

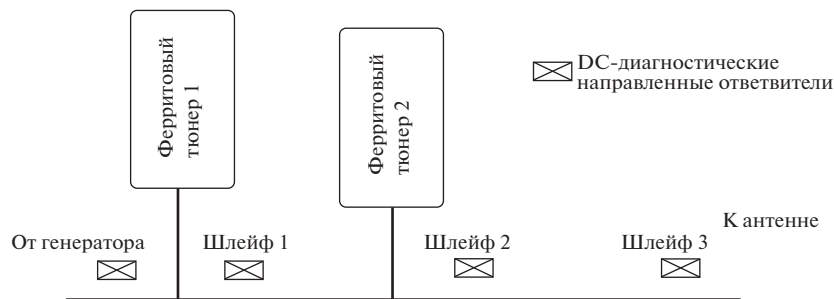


Рис. 2. Схема согласования импеданса в реальном времени с тремя шлейфами.

альных Т-соединениях, расположенных вне вакуумного объема. Согласование генератора с антеннами производится в две ступени. На первой ступени используется компенсация входных реактивностей петель антенн за счет рабочей длины тромбонов. Вторая ступень согласования генератора с приведенным к сечению Т-соединения активным импедансом антенн производится подстройкой шлейфа и тромбона в выходном фидере ВЧ-генератора. Схема системы согласования ЕСТ, используемая на JET, представлена рис. 1. Принятая конфигурация цепи ЕСТ позволяет произвольно фазировать петли внутри антенны и исключает отрицательное влияние взаимной связи между сопряженными петлями на производительность системы.

Средний уровень поглощенной ВЧ-мощности при работе системы ЕСТ с двумя антеннами А2 JET в режиме Н-моды с ЕЛМами достиг 4 МВт. При работе всех четырех антенн А2 JET одновременно с двумя системами согласования: ЕСТ и с гибридными 3dB-разделителями поглощенная ВЧ-мощность в режиме с ЕЛМами составила 7 МВт [8].

Система согласования с использованием быстрой ферритовой настройки в реальном времени (FFT), внедренная на токамаке Alcator C-Mod, подробно описана в работе [13]. Она

представляет собой систему с тремя шлейфами, схема приводится на рис. 2. Ближайший шлейф к антенне имеет фиксированную длину, а два других шлейфа являются переменными шлейфами, каждый из которых представляет собой комбинацию участка линии передачи фиксированной длины и ферритового тюнера.

Скорость распространения радиочастотных волн в линии передачи определяется электрической диэлектрической проницаемостью ϵ и магнитной проницаемостью μ . Принцип работы ферритовых тюнеров заключается в том, что μ ферритовых плиток внутри тюнеров может изменяться в реальном времени, и в результате тюнеры способны следить за изменением нагрузки антенн ИЦРН из-за изменений в плазме. Ферритовые плитки погружены в постоянное магнитное поле. Чтобы изменить эквивалентную длину линейного участка, заполненного ферритовыми плитками, мы изменяем μ , добавляя магнитное поле смещения к постоянному окружающему полю, которое перемещает ферритовые плитки в различные положения на кривой намагничивания. Изменение этого поля смещения достигается изменением тока в катушках тока, окружающих плитки. Таким образом, ферритовые тюнеры ведут себя как шлейфы переменной длины, кото-

рыми можно просто управлять токами катушки снаружи.

Эта система способна достигать и поддерживать отраженную мощность ВЧ-генераторов менее чем на 1% в режиме реального времени практически при всех плазменных условиях и помогает обеспечить надежную работу антенн высокой мощности. Использование четырехпетельной антенны, сориентированной поперек магнитного поля за счет снижения ВЧ-напряжений в передающих линиях, позволило подавать ВЧ-энергию в плазму мощностью 3.7 МВт от источника мощностью 4 МВт [13].

Антенна

Загрязнение примесями и локализованные тепловые нагрузки, связанные с работой антенны ионного циклотронного диапазона частот (ИЦР), являются одними из наиболее сложных проблем для использования ИЦР-нагрева. Поток примесей в плазму генерируется взаимодействием ионов, ускоренных в полях, ассоциированных с медленной волной на периферии плазмы, с первой стенкой и поверхностью антенны. С целью уменьшить генерацию примесей волной на токамаке Alcator C-Mod была разработана и успешно применена антенна, сориентированная поперек магнитного поля [17].

Антенна, ориентированная поперек магнитного поля (ПА) представляет собой четырехпетельную ИЦР-антенну, в которой токовые петли и стороны корпуса антенны перпендикулярны, а стержни экрана Фарадея параллельны общему магнитному полю [18]. При использовании ПА-антенны наблюдается, что примесное загрязнение и источник примеси на антенне уменьшаются по сравнению с использованием типовой антенны, ориентированной по тору (ТА). Общая осаждаемая ВЧ-энергия на антенне значительно возрастает, когда антенна ПА работает при монополюсном фазировании петель по сравнению с дипольной фазировкой. ПА-антенна также более толерантна к изменениям нагрузки при ELMax по сравнению с ТА-антеннами [18]. Стоит отметить, что как при L-, так и при H-модовых разрядах излучаемая мощность для разряда с нагревом ПА-антенны на 20-30% ниже, чем для разряда с нагревом двух ТА-антенн.

Разработка и успешное применение трехпетельной антенны обеспечило возможность снижения наведенных токов в корпусе антенны, и таким образом снижение локального высокочастотного потенциала, что в экспериментах на ASDEX Upgrade [19] продемонстрировало существенное снижение поступления в плазму примесей по сравнению с работой с двухпетельной антенной.

Применение трехпетельных ИЦР-антенн с полностью вольфрамовыми лимитерами на ASDEX Upgrade приводит к уменьшению и содержания W в плазме по крайней мере в два раза по сравнению с двухпетельными антеннами с вольфрамовыми лимитерами, используемыми ранее [20].

В работе [21] представлены экспериментальные данные локальных значений ВЧ-тока, постоянного тока, выхода распыления вольфрама для нескольких местоположений на трехпетельной антенне в зависимости от вариаций баланса мощностей в петлях антенны и фазировки петель. Величины испытывают минимум при дипольной фазировке петель, и когда мощность центральной петли близка к удвоенной сумме мощностей крайних петель.

Предполагается, что для системы ИЦР-нагрева на TRT будет использован экваториальный патрубок с поперечными размерами: ширина 63 см и высота 100 см.

По результатам анализа и проработки конструктивных элементов антенны в дальнейшем будет выбран трех- или четырехпетельный вариант конструкции ИЦР-антенны с ориентацией петель поперек магнитного поля (ПА) либо с типовой ориентацией (ТА). Конструкция антенны будет сильно зависеть от того, как она будет крепиться: вставляться снаружи через патрубок или крепиться со стороны вакуумной камеры. От этого будет зависеть размер площади антенны, а значит величина излучаемой ВЧ-мощности системы ИЦРН.

При использовании антенны с наружным креплением легче применить радиальную подвижку без нарушения вакуума для оптимизации связи антенны с плазмой.

ВЧ-генератор

Опыт эксплуатации систем ИЦРН в токамаках JET и ASDEX Upgrade показал хорошую работоспособность и достаточную гибкость систем на основе ВЧ-генераторов с контролируемым внешним возбуждением [4, 9, 19]. Один из вариантов исполнения такого усилителя ВЧ-мощности с тетродом TH526A в выходном каскаде представлен на рис. 3.

Система ВЧ-питания петель антенны системы ИЦРН TRT должна содержать автоматическую подстройку частоты и систему регулировки сдвига фазы выходного напряжения между разными ВЧ-генераторами. С этой целью в выходном фильтре усилителя, содержащем регулируемые элементы системы согласования генератора и нагрузки, используется последовательность диагностических направленных ответвителей.

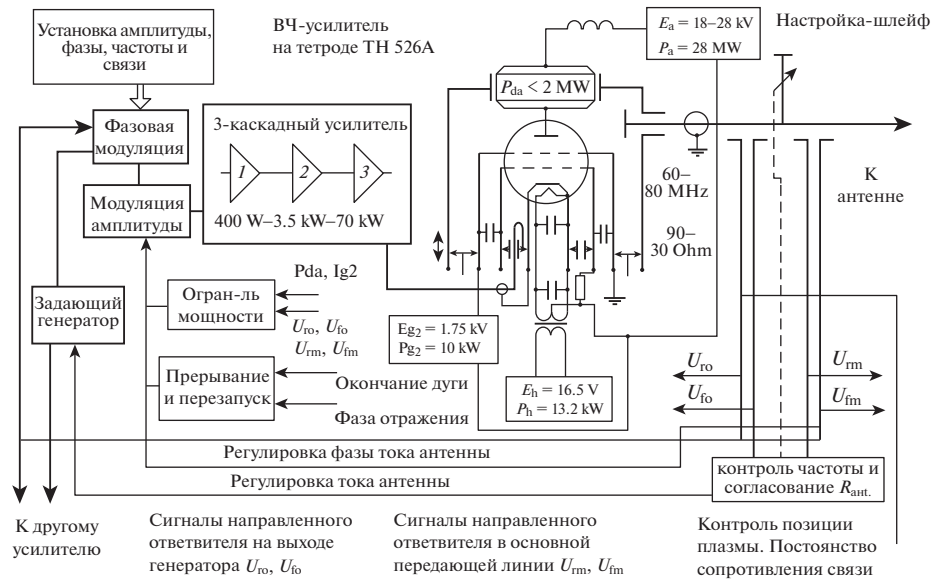


Рис. 3. Структурная схема ВЧ-генератора.

Обработка по заранее отработанному алгоритму аналоговых сигналов проходящей и отраженной мощностей позволяет отслеживать коэффициент стоячей волны напряжения (КСВН) в фидере и формировать необходимые сигналы управления шлейфом для поддержания его на заданном уровне от 1 до 1.5 во время передачи энергии в нагрузку. Высокое значение КСВН (более 3) при развитии пробоя в ВЧ-тракте используется для формирования сигнала защиты лампы от возникающих перенапряжений и кратковременного отключения питания усилителя. В каждом канале усиления имеется трехкаскадный предусилитель, который содержит управляемый задающий генератор на ВЧ транзисторах и два последовательных каскада усиления на высоковольтных тетрадах. Оконечный каскад на тетроде ТН526А выполнен по схеме однотактного усилителя с общей сеткой с входным и выходным контурами на коаксиальных линиях. Выходной каскад работает в режиме класса В (либо С) с углом осечки анодного тока не более 90° . Высокая собственная добротность коаксиального резонатора должна обеспечить высокий КПД нагруженного контура и общий КПД выходного каскада близким к теоретическому пределу 78%. При этом в режиме близком к критическому амплитуда импульса анодного тока будет на уровне 420 А, а амплитуда первой гармоники на основной резонансной частоте выходного контура порядка 210 А. Для исключения возможности самовозбуждения выходного каскада рабочая частота возбуждителя должна быть не выше так называемой частоты “самонейтрализации” тетрода, которая зависит как от межэлектродных емкостей лампы, так и от индуктивности подсо-

единения экранной сетки к катоду. Применение схемы с общей сеткой помимо того, что обеспечивает устойчивую работу генератора на более высоких частотах, позволяет передавать большую часть мощности возбуждителя непосредственно через проходную емкость лампы в полезную нагрузку. Колебательная мощность в выходном контуре при постоянном анодном напряжении 24 кВ должна быть на уровне 2 МВт при частотах 60–80 МГц. Максимальная мощность, отбираемая от источника анодного напряжения в ламповый контур, достигает в этом режиме 2.76 МВт, коэффициент усиления мощности в окончательном каскаде составляет 14.5 дБ. Коаксиальные разделительные емкости задают режим тетрода по постоянному току, а реактивное сопротивление элемента связи трансформирует волновое сопротивление фидера в такое вносимое сопротивление в контур, которое обеспечит заданное значение КПД резонансной системы.

Выходное сопротивление ВЧ-генераторов выбрано равным 30 Ом (сопротивление, при котором коэффициент передачи по мощности максимальный для генератора при неизменном допустимом напряжении пробоя в коаксиальной линии). Волновое сопротивление всех передающих линий выбирается также $Z_0 = 30$ Ом, как и волновое сопротивление вакуумной передающей линии.

Источник питания ВЧ-генератора

Максимальная импульсная мощность, потребляемая каждой ВЧ-лампой ТН526А из цепи анодного питания, составляет 2.8 МВт. С учетом

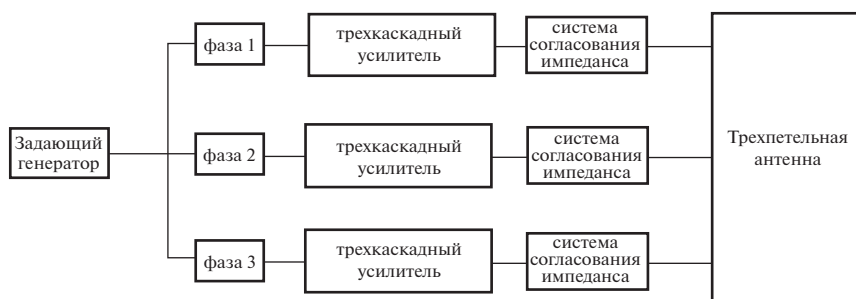


Рис. 4. Укрупненная блок-схема системы ИЦР.

мощности каналов предварительного усиления порядка 100 кВт, необходима разработка специальных источников питания ВЧ-модулей мощностью по 3 МВт, общая потребляемая мощность составит 9 МВт. Кроме того, к источникам питания предъявляются следующие дополнительные требования: регулировка выходного напряжения от $0.2U_{\max}$ до U_{\max} ; работа при изменении длительности ВЧ-импульса от 1 мс до 100 с; быстродействующая защита, предотвращающая выходы из строя ВЧ-лампы, фидера и антенного контура при возникновении в них пробоев.

Схема системы ИЦРН

На данное время предполагается, что в системе ИЦРН будет использоваться одна антенна, состоящая из трех тороидальных петель, каждая из которых будет запитываться через систему согласования импеданса от отдельного ВЧ-генератора мощностью до 2 МВт и может быть фазирована относительно других петель. Фаза и амплитуда в трех каскадных усилителях ВЧ-генератор будет задаваться системой фазовой и амплитудной модуляции. Укрупненная блок-схема системы ИЦРН приведена на рис. 4.

Стоит отметить, что обычно в системах ИЦРН-плазмы токамаков используются нескольких антенн, расположенных осесимметрично по тору для более равномерного нагрева плазмы и, следовательно, уменьшения градиентов температуры компонентов плазмы и сохранения устойчивости конфигурации плазмы. При этом увеличивается доступная площадь для установки и подключения антенн к системам согласования и генераторам. На пример, на токамаке JET используется четыре антенны A2 и ILA-антенна (ИТЭР-подобная антенна) [20], на ASDEX Upgrade четыре антенны [20], на Alcator C-Mod три антенны [18], на EAST две антенны [22].

Основные первоначальные работы по системе ИЦРН

- детальная проработка и выбор системы согласования импеданса;
- проработка согласующих элементов, включая шлейфы, ферритовые тунеры, тромбоны и т.п.;
- разработка диагностического оборудования, в том числе направленных ответвителей и т.п.;
- проработка и выбор геометрической конфигурации многопетельной антенны;
- разработка и изготовление прототипа многопетельной антенны с экраном Фарадея, вакуумной передающей линии, узла проходного керамического изолятора;
- для определения оптимальной фазировки петель в антенне, а также для оценки сопротивления связи с плазмой необходимо провести расчеты с использованием полноволнового или лучевого кода;
- проведение электрических, электромеханических, тепловых расчетов узлов системы ИЦРН с использованием расчетных пакетов ANSYS или COMSOL Multiphysics;
- разработка и изготовление стенда для проведения испытаний прототипа антенны, вакуумной передающей линии, элементов передающих линий, согласующих элементов.

На стенде ИЦРН-токамака TRT должны быть проведены следующие исследования:

- испытания на электрическую прочность узлов антенны, вакуумной передающей линии, согласующих элементов, в том числе проходных керамических и опорных изоляторов;
- исследования нагрева петель антенны, керамических изоляторов и контактных узлов электрического контура;
- исследования возможности возникновения мультипакции (резонансного вакуумного разряда) в области пучности тока в петлях антенны.

3. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе проведен обзор трех систем согласования импеданса в системах ИЦРН: система с гибридными 3дВ-разделителями (3дВ hybrid couplers system) и внешняя Т-сопряженная (ЕСТ), примененные на JET, и система с быстрой ферритовой настройкой в реальном времени (FFT), примененная на Alcator C-Mod. Отмечено, что применение трехпетельной антенны на ASDEX Upgrade и четырехпетельной, ориентированной поперек магнитного поля антенны на Alcator C-Mod приводит к уменьшению загрязнения плазмы примесями. Приведены параметры, определен ориентировочный предварительный состав системы ИЦРН-плазмы TRT и представлена укрупненная блок-схема.

На последующих этапах проектирования системы ИЦРН будет выбрано количество ИЦР-антенн, система согласования импеданса и определена геометрическая конфигурация многопетельной антенны. После этого будет разработана общая полная схема системы ИЦРН TRT.

Работа была выполнена при финансовой поддержке госкорпорации Росатом в рамках договора от 5 сентября 2019 г. № 313/1671-Д.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Вдовин В.Л., Зиновьев О.А., Иванов А.А., Козоровитский Л.Л., Параил В.В., Рахимбабаев Я.Р., Русанов В.Д. // Письма в ЖЭТФ. 1971. Т. 14. Вып. 4. С. 228.
2. Вдовин В.Л., Зиновьев О.А., Иванов А.А., Козоровитский Л.Л., Параил В.В., Рахимбабаев Я.Р., Русанов В.Д., Шапотковский Н.В. // Письма в ЖЭТФ. 1973. Т. 17. Вып. 1. С. 4.
3. Вдовин В.Л., Зиновьев О.А., Русанов В.Д., Шапотковский Н.В. // Письма в ЖЭТФ. 1976. Т. 24. Вып. 7. С. 410.
4. Белов А.М., Гетман Д.В., Гостев А.А., Губин А.М., Субботин М.Л. // ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез. 2019. Т. 42. Вып. 27. С. 48.
5. Vrancken M., Mayoral M.-L., Blackman T. et al. // Fusion Eng. Des. 2007. V. 82. P. 873.
6. Faugel H., Angene P., Becker W., Braun F., Bobkov V. et al. // Fusion Eng. Des. 2005. V. 74. P. 319.
7. Bernard J.-M., Mollard P., Bruno V. et al. // Fusion Eng. Des. 2017. V. 123. P. 217.
8. Monakhov I., Graham M., Blackman T. // AIP Conf. Proc. 2009. 1187. P. 205; <https://doi.org/10.1063/1.3273729>
9. Monakhov I., Graham M., Blackman T. et al. // Nuclear Fusion. 2013. V. 53. 083813.
10. Qin C.M., Zhao Y.P., Zhao Y.Z., Din J.Y., Wang P., Pan Y.P. et al. // Plasma Sci. Technol. 2003. P. 1779.
11. Saito K., Kumazawa K., Takahashi T., Yokota M., Takeuchi H., Mutah T. et al. // Fusion Eng. Design. 2006. V. 81. P. 2837.
12. Lin Y., Binu A., Wukitch S.J. // Fusion Eng. Design. 2009. V. 84. P. 33.
13. Lin Y., Binu A., Wukitch S.J., Koert P., Murray R., Pfeiffer A. // Fusion Eng. Design. 2015. V. 100. P. 239.
14. Chen, Zhao G.Y., Mao Y., Yuan S., Zheng G., Zheng F., et al. // Fusion Sci. Tech. 2012. V. 61. P. 301.
15. Wang S.J., Hong B.G. // J. Kor. Phys. Soc. 2006. 49. S302-S304.
16. Красильников А.В., Коновалов С.В., Бондарчук Э.Н., Мазуль И.В., Родин И.Ю., Минеев А.Б., Кузьмин Е.Г., Кавин А.А., Карпов Д.А., Леонов В.М., Хайрутдинов Р.Р., Кукушкин А.С., Портнов Д.В., Иванов А.А., Бельченко Ю.И., Денисов Г.Г. // Физика плазмы. 2021. № 11.
17. Wukitch S.J., Garrett M.L., Ochoukov R., Terry J.L., Hubbard A., Labombard B., Lau C., Lin Y., Lipschultz B., Miller D. et al. // Phys. Plasmas. 2013. V. 20. 056117.
18. Wukitch S.J., Brunner D., Ennever P., Garrett M.L., Hubbard A., Labombard B., Lau C., Lin Y., Lipschultz B., Miller D., Ochoukov R., Porkolab M., Reinke M.L., Terry J.L. et al. // AIP Conference Proceedings. 2014. 1580. 73. P. 73.
19. Bobkov V., Braun F., Dux R., Herrmann A., Faugel H., Füngelder H., Kallenbah A., Neu R., Noterdaeme J.-M., Ochoukov R. et al. // Nucl. Fusion. 2016. V. 56 (8). 08400.
20. Bobkov V., Aguiam D., Baruzzo M. et al. // Nucl. Mater. and Energy. 2017. V. 12. P. 1194.
21. Bobkov V., Bilato R., Colas L. et al. // EPJ Web of Conferences. 2017. 157. 03005.
22. Liu F.K., Zhao Y.P., Shan J.F. et al. // EPJ Web of Conferences. 2017. 157. 02010.