УДК 621.039.643

ЦЕЛИ МОДЕРНИЗАЦИИ СИСТЕМЫ ИЦР-НАГРЕВА ПЛАЗМЫ УСТАНОВКИ ТСП ТРИНИТИ ПОД ЗАДАЧИ ПРОЕКТА ИГНИТОР

А.М. Белов¹, Д.В. Гетман¹, А.А. Гостев², А.М. Губин¹, М.Л. Субботин¹¹НИИЦ «Курчатовский институт», Москва, Россия²АО «ГНЦ РФ Троицкий институт инновационных и термоядерных исследований», Троицк, Москва, Россия

В статье представлена система ИЦР-нагрева (ИЦРН) плазмы токамака Т-14 комплекса ТСП ТРИНИТИ: цель, особенности реализации, характеристики, система питания, физическое состояние, также обсуждаются подходы и возможность модернизации системы ИЦРН комплекса ТСП ТРИНИТИ для проекта токамака Игнитор. Токамак Игнитор предназначен для достижения зажигания плазмы и облегчения достижения режимов с высоким удержанием плазмы. Для этого необходима согласно проекту токамака Игнитор система ИЦРН плазмы, состоящая из 8 ВЧ-генераторов частотой 80—115 МГц, с максимальной мощностью генераторов 2 МВт при 80 МГц и 1 МВт при 115 МГц с длительностью рабочего ВЧ-импульса до $t_{\text{ВЧ}} = 4$ с. ВЧ-система ИЦРН комплекса ТСП ТРИНИТИ создавалась для дополнительного нагрева плазмы токамака Т-14 на уровне мощности 2 МВт с частотой <30 МГц на стадии предварительного сжатия плазменного шнура ($B_T = 2$ Т, $n_e = 0,5 \cdot 10^{20} \text{ м}^{-3}$, $t_{\text{ВЧ}} = 0,1$ с) для повышения эффективности адиабатического сжатия плазменного шнура. ВЧ-система комплекса ТСП ТРИНИТИ реализована на принципе автоколебательной системы — использование излучающего элемента (антенны) в составе резонансного контура и подключение его к цепям ВЧ-лампы с помощью резонансного согласующего фидера, что позволяло обеспечить высокую стабильность частоты автоколебаний и добиться автоматического перехода генератора в оптимальный граничный режим при появлении плазменной нагрузки. Обсуждаются технические решения модернизации как ВЧ-системы, так и источника питания комплекса ТСП ТРИНИТИ в соответствии с текущими требованиями проекта токамака Игнитор.

Ключевые слова: управляемый термоядерный синтез, комплекс ТСП ТРИНИТИ, проект токамака Игнитор, токамак с сильным полем (Т-14), зажигание термоядерной реакции, ИЦРН, модернизация инфраструктуры.

MODERNIZATION PURPOSES OF ICR PLASMA HEATING SYSTEM IN THE TRINITI TSP FACILITY FOR IGNITOR PROJECT TASKS

А.М. Belov¹, D.V. Getman¹, A.A. Gostev², A.M. Gubin¹, M.L. Subbotin¹¹NRC «Kurchatov Institute», Moscow, Russia²Troitsk Institute for Innovation and Fusion Research (TRINITI), Troitsk, Moscow, Russia

The paper presents the ICR-heating system of the TSP TRINITI complex: purpose; features of implementation; characteristics; power system; physical condition; and also discusses the possibility of upgrading the system of ICRH of the TSP TRINITI complex for the IGNITOR project abstract itself. According to the project of tokamak Ignitor to accelerate the plasma ignition and facilitate the access to high confinement regimes need a system of ICRH of the 8 generators with frequencies of 80—115 MHz, the maximum power of the generator 2 MW at 80 MHz and 1 MW at 115 MHz, the pulse duration to 4 s. The RF system was created for ICR-heating of the plasma of the TSP TRINITI at the power level of 2 MW with a frequency <30 MHz in the pre-compression stage of the discharge ($B_T = 2$ T, $n_e = 0,5 \cdot 10^{20} \text{ m}^{-3}$, $t_{\text{RF}} = 0.1$ s) to improve the efficiency of adiabatic compression of the plasma. Technical proposals are being developed to upgrade both the RF system and the power supply of the TSP TRINITI complex in accordance with the current requirements of the tokamak Ignitor project.

Key words: controlled thermonuclear fusion reaction, TSP TRINITI complex, tokamak Ignitor project, tokamak with a strong field (T-14), ignition of a thermonuclear fusion reaction, ICR-heating, modernization of infrastructure.

DOI: 10.21517/0202-3822-2019-42-2-48-65

ВВЕДЕНИЕ

Уже на ранних стадиях исследований токамаков стало ясно, что используемый в них омический нагрев недостаточен для получения температур, необходимых для возникновения самоподдерживающейся термоядерной реакции. В связи с этим начались поиски методов нагрева, дополнительных к омическому нагреву плазмы. Наиболее подходящими среди них представляются метод, основанный на инжекции в плазму быстрых нейтральных атомов, методы, использующие бесстолкновительное поглощение высокочастотных волн, и метод адиабатического сжатия плазмы нарастающим магнитным полем.

Наибольшие успехи в мире достигнуты в разработке и применении метода инжекции нейтральных атомов. С помощью этого метода удалось получить на современных токамаках температуры, близкие к необходимым для управляемого термоядерного синтеза. Однако на пути применения инжекции ней-

тральных атомов в термоядерном реакторе стоят большие технологические трудности, связанные, в первую очередь, с генерацией необходимой мощности пучка, эффективной системой поглощения паразитных ионных потоков, не подвергшихся объёмной нейтрализации, и проблемой эффективной нейтрализации отрицательно заряженных ионов. В связи с этим, несмотря на успехи метода инъекции, всё большее развитие получают высокочастотные методы нагрева плазмы.

В этом направлении выполнен очень большой объём теоретических и экспериментальных исследований высокочастотных и сверхвысокочастотных методов нагрева плазмы в токамаке, основанных на резонансе ионов и электронов в плазме на характерных для них резонансных частотах, и проведён целый ряд соответствующих инженерных разработок. Разработаны требования к методам дополнительного нагрева, описана теория основных физических эффектов, определяющих высокочастотный нагрев плазмы, в том числе характеристики распространения волн, механизмы поглощения волн и нагрева плазмы, нелинейные эффекты, сопровождающие нагрев.

Научная цель установки Игнитор — исследование физических процессов в плазме токамака при достижении зажигания с плотной плазмой и сверхсильными магнитными полями. Проект Игнитор развивается из исследовательских программ с достижением предзажигания, реализованных на токамаках серии ALCATOR (Alcator, Alcator-C, Alcator C-Mod) в MIT (США) на протяжении 1980—2010-х гг. и токамаках серии FT (FT, FTU) ENEA (Италия) в эти же годы. Токамаки Alcator C-Mod, FTU были закрыты для исследований в 2017 г. В России в 1980—1990-х гг. была реализована аналогичная программа термоядерных исследований на токамаке Т-14, комплекс ТСП (токамак с сильным полем) АО «ГНЦ РФ ТРИНИТИ» (г. Троицк, Большая Москва).

Для достижения зажигания в условиях плотной плазмы и сверхсильных полей также используется система дополнительного ВЧ- и СВЧ-нагрева в дополнение к омическому нагреву плазмы. Основные исследования проводились в четырёх диапазонах частот, в которых имеются бесстолкновительные механизмы поглощения волн плазмой, связанные с резонансами различного типа: электронно-циклотронного, ионно-циклотронного, ниже-гибридного и альфвеновского. Проведены эксперименты по нагреву плазмы в токамаках при вводимой в плазму мощности, значительно превышающей мощность омического нагрева. В диапазоне частот ионно-циклотронного нагрева эта мощность достигала более 4 МВт, в диапазонах электронно-циклотронного и нижнего гибридного нагрева более 1 МВт. Максимальная полученная при этом температура существенно превысила температуру при омическом нагреве и приблизилась к температуре, достигнутой при нагреве с помощью инъекции нейтральных атомов. Также следует отметить в качестве метода дополнительного нагрева плазмы токамака метод адиабатического сжатия плазменного шнура по большому и малому радиусам нарастающим магнитным полем (Т-14, комплекс ТСП).

Физические аспекты ионно-циклотронного нагрева плазмы и поддержания тока в токамаке. Ионно-циклотронный резонансный (ИЦР) метод нагрева плазмы и поддержания тока (ПТ) может решить следующие задачи:

- преимущественный нагрев основного компонента ионов;
- поддержание безиндукционного тока быстрыми волнами (БВ) в центральных областях плазмы с эффективностью $\gamma = 0,1$ при температуре электронов 10 кэВ и $Z_{эф} < 2,0$;
- создание тока во внешних областях плазмы с высокой степенью локализации для подавления МГД-неустойчивостей, например, подавления неоклассической тиринг-моды при высоких β_N (режим конверсии мод в плазме с двумя сортами ионов);
- создание энергичной популяции малой добавки ионов с целью изучения подавления пилообразных колебаний, физики возбуждения неустойчивостей (ТАЕ-моды и др.), являющихся приоритетными в программе ИТЭР;
- нагрев основной массы электронов (БМЗ-волны и ион-ионный гибридный резонанс);
- создание тороидального вращения плазмы в средних областях плазмы с эффективностями, сравнимыми при нейтральной инъекции.

Эффективности нагрева ионов и электронов пропорциональны β_i (при нагреве на второй гармонике) и β_e соответственно, что важно при достижении β , близких к критическим.

Возможные сценарии нагрева плазмы и поддержания тока:

— сценарии с малыми добавками резонансных ионов (добавка — в скобках): D (^3He) — нагрев ионов, D (H) — энергичный хвост протонов (нагрев электронов, стабилизация зубцов);

— сценарии конверсии мод: H (D), H (^4He) — эффективная генерация внеосевого тока со стороны сильного магнитного поля, стабилизация неоклассической тиринг-моды, H (^3He) — генерация внеосевого тока со стороны слабого магнитного поля (как в ЭЦ-методе), D (H), большая добавка водорода — нагрев электронов;

— сценарии на основной гармонике: $\omega = \omega_{\text{CD}}$ — нагрев ионов и электронов, $\omega = \omega_{\text{CH}}$ — нагрев ионов и электронов;

— сценарии поддержания тока в центральных областях плазмы: $\omega \approx 2\omega_{\text{CH}}$.

Возможные методы моделирования сценариев нагрева и поддержания тока:

— 3-мерные полноволновые коды (на реальном удлинённом равновесии);

— 2- и 3-мерные коды Фоккера—Планка для ионов и электронов;

— 3-мерные антенные коды.

Развитие метода ионно-циклотронного резонансного нагрева плазмы в токамаках и современное состояние использования метода. Первые работы по ионно-циклотронному нагреву плазмы в токамаках были выполнены в СССР в 1970—1976 гг. на установке токамак ТМ1-ВЧ. Руководителем проекта создания токамака ТМ1-ВЧ был В.Л. Вдовин. Общий вид токамака ТМ1-ВЧ представлен на рис. 1.

Технические параметры токамака ТМ1-ВЧ:

Большой радиус R , м . . .

0,4

Малый радиус a , м . . .

0,085

Ток разряда I_p , кА . . .

25

Тороидальное поле B_T , Тл . . .

1,5

Длительность разряда τ , с . . .

0,05

Плотность электронов n_e , см^{-3} . . .

$(0,2\text{—}3,0)10^{13}$

Температура электронов на оси $T_{e(0)}$, эВ . . .

<200

Температура ионов на оси $T_{i(0)}$, эВ . . .

<100

Рис. 1. Токамак ТМ1-ВЧ

На этом токамаке впервые в мире 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 второй гармоники 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, TFTR, PLT, TEXTOR, ASDEX) и больших (JET, JT-60U, TS) токамаках.

В настоящее время ионно-циклотронный нагрев плазмы используется практически во всех крупных действующих токамаках, включая прототип токамака Игнитор — токамак Alcator C-MOD. Параметры современных токамаков и систем ионно-циклотронного резонансного нагрева в них представлены в таблице (в таблице использованы данные, представленные в [4]).

Для подтверждения идеи осуществления зажигания в компактных токамаках с сильными магнитными полями и высокой плотностью плазмы в США в течение более 30 лет были построены и исследовались токамаки серии Alcator [5—7]. В СССР под руководством академиков Е.П. Велихова и Б.Б. Кадомцева осуществлялся проект «Токамак с сильным полем (ТСП)». В ТСП [8] для достижения термоядерных параметров предполагалось использовать механизм адиабатического инварианта, когда с нарастанием магнитного поля плазма перемещалась в область меньшего объёма разрядной камеры, т.е. объём плазмы уменьшался и соответственно росли её плотность и температура.

Параметры современных токамаков и систем ионно-циклотронного резонансного нагрева

Токамак	R_0 , см	a , см	B , Тл	I , МА	τ_i , с	A	K	Диапазон частот, МГц	Генерируемая мощность, МВт	Система согласования	Система реагирования
ASDEX Upgrade	165	50	3,9	1,6	5	4,1		30—120 (реализуется 30—60)	4×2	Двойной шлейф; гибриды 3 dB	Между разрядами; фиксированная
Alcator C-Mod	67	22	≤8,1	1	2	3	~1,7	80 40—80	2×2; 4	Тромбон; шлейф	Между разрядами
DIII-D	167	67	2,2	3	5	2,5	~2	60 60—120	2; 1 на 120 МГц	Гибриды 3 dB	Фиксированная
JET	296	125	3,4	4,8	15		~1,7	23—57	16×2	Тромбон; шлейф; частота	16,5 см/с; 5 см/с; ±200 кГц в 1 мс
JT-60U	300	100	5	3	10	3,1	1,5—2	102—131	8×1,5	Тромбон; шлейф; частота	0,5 см/с; 2 см/с; 400 кГц, 10—80 мс
NSTX	86	68	≤0,5	1	1—5	≥1,25	2—3	30	6×2	Тромбон; шлейф	Между разрядами
TEXTOR	175	47	3	0,9	10	4	1	25—38	2×2	Тромбон; шлейф; конденсаторы	Между разрядами; между разрядами; 20—30 мс
Tore Supra	235	80	4,5	2	30	3	1	35—80	3×2×2	Резонансная двойная петля (конденсаторы)	200 мс
Глобус-М	36	24	0,5	0,3	0,3	1,5	1,5—2	7—30	0,5	Шлейф	Между разрядами

С 2010 г. согласно межправительственному Меморандуму о взаимопонимании специалисты Италии и России изучают возможность осуществления предусмотренного проектом Игнитор эксперимента по зажиганию на основе инженерно-физической и энергетической инфраструктуры комплекса ТСП АО «ГНЦ РФ ТРИНИТИ».

В соответствии с достигнутыми российско-итальянскими договорённостями основной зоной ответственности Российской Федерации является подготовка инженерно-физической и энергетической инфраструктуры, обеспечивающей приём, сборку и эксплуатацию токамака Игнитор на площадке Российской Федерации.

ПОДХОДЫ В ПОСТРОЕНИИ СИСТЕМЫ ИЦРН ПЛАЗМЫ ТОКАМАКА

Реализация системы ИЦРН плазмы имеет как традиционный подход, связанный с применением набора промышленных высокочастотных модулей, построенных на базе многокаскадных ламповых усилителей мощности [9], так и альтернативный — построение однокаскадных автоколебательных систем на основе мощных генераторных триодов [10].

Использование промышленных высокочастотных модулей обладает рядом очевидных преимуществ, связанных с возможностью оперативного управления частотой и фазой колебаний. Такие системы отличаются высокой технической сложностью, требуют выполнения специальных мер по обеспечению согласования с изменяющейся нагрузкой и, как следствие, обладают значительной стоимостью.

При альтернативном подходе (построение ВЧ-комплекса на принципе автоколебательной системы) использование излучающего элемента антенны в составе резонансного контура и подключение его к цепям ВЧ-лампы с помощью резонансного согласующего фидера позволяет обеспечить высокую стабильность частоты автоколебаний и добиться автоматического перехода генератора в оптимальный граничный режим при появлении плазменной нагрузки. Принципиальный недостаток системы, построенной на принципе автогенерации, — сложность управления частотой и фазой колебаний, а также определённые ограничения сверху на длину фидеров и генерируемую частоту, связанные с уплотнением спектра собственных колебаний и сложностью селекции рабочего резонанса.

ИЦРН ТОКАМАКА Т-14 КОМПЛЕКСА ТСП

Автогенераторы с резонансной нагрузкой были успешно использованы в экспериментах ИЦРН плазмы на ряде российских токамаков (ТО-2, Л-2, «Туман-3», Т-11М). Высокая надёжность при относи-

тельно невысокой стоимости такой ВЧ-системы обусловила выбор данной схемы при создании генераторов для ИЦРН плазмы в токамаке Т-14 (комплекс ТСП) [10].

ВЧ-система комплекса ТСП создавалась под задачу ИЦРН на уровне мощности 2 МВт в предкомпрессионной стадии разряда ($B_T = 2$ Тл, $n_e = 0,5 \cdot 10^{20} \text{ м}^{-3}$, $t_{ВЧ} = 0,1$ с) для улучшения эффективности адиабатического сжатия плазмы. В качестве основного метода нагрева D- или D—Т-плазмы токамака Т-14 планировалось использовать механизм поглощения быстрых волн на циклотронной частоте малой добавкой ионов ^3He .

Принципиальной особенностью ВЧ-системы комплекса ТСП является включение антенны и вносимого плазмой импеданса в качестве составных частей сложного распределённого колебательного контура, в котором происходит самовозбуждение на одной из собственных частот цепи. Достаточным условием стабильности автоколебаний является наличие в полосе частот положительной обратной связи одного резонанса с добротностью $Q > 10$ —15. Поэтому автогенераторные системы оказываются значительно менее чувствительными к изменениям параметров плазмы и условиям ввода ВЧ-мощности.

Упрощённая схема ВЧ-автогенератора ИЦРН комплекса ТСП представлена на рис. 2 [11], схема резонансного антенного модуля комплекса ТСП — на рис. 3.

Рис. 2. Схема ВЧ-автогенератора ИЦРН комплекса ТСП, генератор: на 2 МВт (а) и на 5 МВт (б)

Рис. 3. Схема компактного резонансного антенного модуля ИЦРН комплекса ТСП

В качестве источника питания использовался модулятор «Виктория», в котором реализованы импульсный режим работы и быстродействующая защита. Модулятор состоит из тиристорного преобразовательного агрегата, промежуточного индуктивного накопителя, трёхфазного высокочастотного инвертора, повышающего трансформатора и высоковольтного выпрямителя.

В связи с недостатком финансирования и необходимостью замены вакуумной камеры токамака установка Т-14, начиная с 1992 г., законсервирована. Дальнейшие эксперименты с ИЦРН плазмы на основе ВЧ-автогенераторов проводились на токамаке Т-11М [12, 13]. Тем не менее представляется целесообразным обратить внимание на следующие аспекты системы ионно-циклотронного резонансного нагрева плазмы комплекса ТСП, которые могут оказаться полезными для дальнейшего обсуждения.

На токамаке Т-14 создавалась колебательная система автогенератора на базе триодов ГУ-98А с целью повышения мощности одного генераторного модуля до 5 МВт. Создание модуля такой мощности было обусловлено не столько стремлением увеличить полную излучаемую в плазму мощность, чего можно было бы добиться одновременным включением 2 МВт блоков, сколько требованием сфазированной запитки нескольких антенн. Применение набора сфазированных антенн обусловлено необходимостью формирования оптимального спектра излучения. Кроме того, из-за ограничений на предельную плотность излучаемой мощности, связанных с нелинейными плазменными процессами, мощность, вводимая в плазму одной антенной, не должна была превосходить величину 1,2—1,5 МВт. А поскольку фазировка отдельных 2 МВт модулей представляет собой достаточно сложную задачу, то создание генератора мощностью 5 МВт, нагруженного четырьмя имеющимися на токамаке Т-14 антеннами, позволяет полностью решить задачи по нагреву плазмы.

Колебательная система автогенератора с селективной обратной связью и резонансной нагрузкой имеет следующие условия реализации:

— один из резонансов колебательной системы совпадает с требуемой рабочей частотой f_p ;

- добротность рабочего резонанса не ниже $Q \geq 10-15$;
 - смещение частоты рабочего резонанса при изменении параметров нагрузки не превосходит заданной величины;
 - сеточное напряжение V_c на частоте рабочего резонанса противофазно анодному напряжению V_a и составляет по абсолютной величине заданное значение $|K_{oc}|$;
 - сеточное напряжение на частоте боковых резонансов синфазно с анодным напряжением;
 - мощность, выделяемая в активной нагрузке на частоте рабочего резонанса при максимальном анодном напряжении, соответствует заданной;
 - напряжение на элементах схемы на частоте резонанса не превосходит заданное значение.
- Основные технические параметры колебательной системы автогенератора:
- максимальная полная активная мощность при работе на четыре антенны до 5 МВт;
 - максимальная активная мощность в расчёте на одну антенну до 1,5 МВт;
 - рабочая частота 20—30 МГц;
 - нестабильность рабочей частоты при появлении активной плазменной нагрузки не более 1%;
 - нестабильность рабочей частоты при появлении реактивной плазменной нагрузки не более 5%;
 - максимальное эффективное напряжение на плече антенны 17 кВ (определяется электрической прочностью изоляции вакуумного ввода);
 - максимальное эффективное напряжение на конденсаторе цепи обратной связи 17 кВ (определяется паспортными данными применяемых переменных вакуумных конденсаторов).

Также на токамак КТМ (Казахстанский материаловедческий токамак), основываясь на опыте разработки, создания и использования в России ВЧ-автогенераторов систем ИЦРН, была поставлена в 2009 г. система, аналогичная системе комплекса ТСП. По сравнению с антенным модулем, используемым в ВЧ-системе на токамаке Т-11М, на КТМ были предусмотрены для регулировки связи с плазмой возможность радиального перемещения антенного модуля в патрубке на ± 10 мм и подстройка частоты антенного контура с помощью подстроечных ёмкостей без нарушения вакуума, рабочая частота 13 МГц [14]. Эксперименты с ИЦРН плазмы в КТМ с помощью этой системы ещё не производились (первый этап физического пуска установки токамак КТМ осуществлён летом 2017 г.).

Таким образом, на крупных установках эксперименты с ИЦРН плазмы с использованием ВЧ-автогенераторов не ведутся значительное время, что привело к отсутствию как живого практического опыта, так и прогресса в этом направлении.

ИЦРН НА ДЕЙСТВУЮЩИХ ТОКАМАКАХ

Системы ИЦРН, работающие на JET. Технические параметры системы ИЦРН: диапазон частоты 23—57 МГц, 16 генераторов по 2 МВт, 4 ИЦР-четырёхпетельные антенны А2 JET, площадь антенны 1,69 м².

На JET используются две ИЦРН-системы с разделением генерируемой ВЧ-генератором мощности между двумя однотипными короткозамкнутыми петлями двух соседних антенн, толерантных к ELMам: система с использованием гибридных 3dB-разделителей (3dB hybrid couplers system) и внешняя Т-сопряжённая система согласования импеданса (External Conjugate-T (ECT) impedance matching system) [15, 16].

Система с использованием гибридных 3dB-разделителей на JET представлена в [15]. Гибридные 3dB-разделители установлены для разделения мощности от генераторов В пополам между аналогичными петлями двух антенн А и В А2 JET (рис. 4) и представляют собой четырёхпортовые квадратные четвертьволновые мосты, кото-

Рис. 4. Схема подключения антенн А и В после установки гибридных 3dB-разделителей. На схеме указано расположение тромбонов ($\uparrow$), шлейфов ($\nearrow$) и диагностических направленных ответвителей ($\otimes$); OTL — выходная передающая линия; STL — разделительная передающая линия; MTL — главная передающая линия. На рисунке серым цветом представлены схемы подключения А2, А3, А4 и В2, В3, В4

рые имеют свойство изолировать генераторы от отражённой 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 выводных портов разветвителя, названных (обозначенных) разделительными передающими линиями (STLs), отражённая мощность пойдёт в согласованную эквивалентную нагрузку (load) вместо того, чтобы идти в выходную передающую линию (OTL) 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. Вместе с тем петли антенн не могут быть расположены слишком далеко друг от друга, так как ELMы не возникают одновременно по всей длине тора, как было показано на ASDEX Upgrade и JET [17].

Внешняя система Т-сопряжения согласования импеданса представлена в [16], её 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 Т-сопряжения к ELMам.

В системе ИЦРН, основанной на принципе Т-сопряжения, соответствующие токопроводящие петли принадлежат разным ИЦР-антеннам, они спарены для того, чтобы сформировать комплексные сопряжённые импедансы на коаксиальных Т-соединениях, расположенных вне вакуумного объёма. Часть схемы согласования импедансов, используемая на JET, представлена на рис. 5. Согласование генератора с антеннами производится в две ступени. На первой ступени используется компенсация входных реактивностей петель антенн за счёт рабочей длины тромбонов. Вторая ступень согласования генератора с приведённым к сечению Т-соединения активным импедансом антенн производится подстройкой шлейфа и тромбона в выходном фидере ВЧ-генератора. Принятая конфигурация цепи ЕСТ позволяет произвольно фазировать петли внутри антенны и исключает отрицательное влияние взаимной связи между сопряжёнными петлями на производительность системы.

Вид антенны А2 JET представлен на рис. 6 [18]. Петли антенн запитываются с помощью вакуумных передающих линий, расположенных в радиальных патрубках с внутренним диаметром 252 мм. Вакуумная передающая линия имеет внешний диаметр 140 мм и внутренний диаметр 85 мм, волновое сопротивление 30 Ом. Расположение антенн А2 в радиальной плоскости внутри

Рис. 5. Обобщённая схема согласования на основе принципа Т-сопряжения, принятая на JET: S1, S2 — переключатели; ITL, CTL, DTL — передающие линии; OTL, MTL, ITL, CTL, DTL — диагностические направленные ответвители; Антенна C, Антенна D — четырёхпетельные антенны

Рис. 6. Одна из четырёх антенн А2 JET, показывающая первую половину антенны полностью без экранов Фарадея, оставляя видимыми токовые петли. Толстые стрелки показывают, что переменный ток может быть сфазирован между петлями независимо

вакуумной камеры JET показано на рис. 7 [19].

Внедрение системы ЕСТ на JET существенно улучшило работу ВЧ-оборудования во время ELMов. Средний уровень поглощённой ВЧ-мощности достиг 4 МВт при работе системы ЕСТ в режиме Н-моды с ELMами. Поглощённая ВЧ-мощность составила 7 МВт в режиме с ELMами при работе четырёх ИЦР-антенн одновременно с двумя системами: ЕСТ и гибридными 3dB-разделителями [16].

Система ИЦРН, работающая на ASDEX Upgrade. Система ИЦРН плазмы на ASDEX Upgrade состоит из четырёх ВЧ-генераторов, имеющих диапазон частоты 30—120 МГц с выходной мощностью каждого генератора до 2 МВт на частоте 80 МГц [20]. ВЧ-мощность доставляется на четыре двухпетлевые антенны, площадь антенны 0,8 м². В системе ИЦРН используются гибридные 3dB-разделители для развязки генераторов от нагрузки, что приводит к её лучшей производительности. Максимальная мощность нагрева плазмы системой ИЦРН достигла 3,2 МВт.

На рис. 8 [20] приведён пример, как потери в эквиваленте нагрузки гибридных 3dB-разветвителей во время ELMов влияют на общую связанную ВЧ-мощность. Во время разряда с высокой плазменной треугольностью и высокой частотой ELMов коэффициент отражения в согласованной линии передачи между антеннами и гибридными 3 dB-разветвителями между ELMами был низким и значительно увеличивался во время ELMов. Таким образом, максимально достижимая общая ВЧ-мощность (мощность для идеально согласованной системы) может быть определена по огибающей (серая линия) от времени трека реальной полной ВЧ-мощности. Разница в мощности между идеальной согласованной системой и реальной системой для этого разряда составляет 7%.

Последние изменения в систему ИЦРН были внесены в начале 2000 г., когда система была расширена для обеспечения её работы в режиме управления током (Current Drive) (рис. 9) [20]. С помощью переключателей S1 и S5 или S2 и S5 каждый генератор можно переключить к нагрузке 1/2 сумматора для испытаний. Для правильной деятельности гиб-

Рис. 7. Расположение ВЧ-антенн в JET

Рис. 8. Связанная ВЧ-мощность и максимально достижимая ВЧ-мощность для идеально согласованной системы (серая линия) (а) и сопротивление антенны, усреднённое для четырёх антенн (б)

Рис. 9. Схема одной из двух одинаковых систем ИЦР при модернизации ASDEX с двумя генераторами и двумя двухпетлевыми антеннами

ридных 3dB-разветвителей фазировка между двумя генераторами должна быть установлена на 900 на входе сумматора. С помощью переключателей N1S3, N2S3, N1S1, N1S2, N2S1 и N2S2 антенные петли могут использоваться в режиме нагрева или в режиме управления током CD. T1g, T1a, T2g и T2a — шлейфы согласующих цепей, Tc — шлейф цепи компенсации, DC (Direct current) — гальванические развязки по постоянному напряжению.

Антенны ASDEX Upgrade запитываются с помощью вакуумных передающих линий, расположенных в радиальных патрубках внутренним диаметром 225 мм. Вид двухпетлевой антенны представлен на рис. 10 [21], расположение антенн в радиальной плоскости внутри вакуумной камеры показано на рис. 11 [19].

Рис. 10. Вид антенны ASDEX Upgrade с открытым экраном Фарадея (1), лимитерами (2), петлями (3) и боковой стенкой (4)

Рис. 11. Конфигурация антенн на ASDEX Upgrade 2014. Лимитеры антенны A1 и A3 покрыты бором, антенны A2 и A4 — вольфрамом

ИЦРН ДЛЯ ПРОЕКТА ИГНИТОР

Физика ИЦРН в проекте Игнитор. В процессе развития проекта Игнитор было изучено применение ИЦРН для определения профилей выделения энергии, которые будут использоваться при анализе переноса. В частности, с использованием полного волнового кода в плоской и тороидальной геометрии проведено параметрическое исследование профилей выделения энергии в зависимости от концентрации примеси, вида примеси, полосы частот для обеих конфигураций (первая — без использования ИЦРН при 11 МА, 13 Тл, вторая — начиная с 9 МА, 11 Тл и ниже с возрастающим увеличением величины вводимой ИЦР-мощности на стадии зажигания разряда). Оптимальная полоса частот найдена в диапазоне 85—95 МГц с доставляемой мощностью 8 МВт (расширенная конфигурация стенки) и 5 МВт (Х-точка). Результаты моделирования токамака Игнитор показывают, что энергия существенно поглощена примесями и перераспределена столкновениями к главному виду ионов плазменной колонны [22, 23].

Необходимость использования ИЦРН в проекте Игнитор. На рис. 12 представлен сценарий, по которому, в принципе, в токамаке Игнитор

Рис. 12. Базовый сценарий разряда в токамаке Игнитор в омическом режиме «зажигания» термоядерной реакции: B_T , Тл (■); I_p , МА (◆) (сценарий 13 Тл, 11 МА)

можно достичь зажигания, действуя только в омическом режиме.

На рис. 13 представлена эволюция омической и альфа-мощности, потеря излучения (примесного, тормозного и синхротронного) в «оптимизированном» случае с использованием модели Коппи—Маццукато. Имитация транспортного кода JETTO остановлена в момент достижения зажигания термоядерной реакции.

На рис. 14 показано, как применение 3 МВт ИЦРН позволяет избежать возникновения пилообразных колебаний (в промежутке с 3 до 5 с разряда).

После осуществления зажигания термоядерной реакции энергия альфа-частиц устойчиво растёт, достигая значений неустойчивости, обусловленной

Рис. 13. Эволюция омической и альфа-мощности, потеря излучения (примесного, тормозного и синхротронного) в токе Игнитор: $P_{\text{Ом}}$ (—); P_{α} (—○—); P_{rad} (—■—)

Рис. 14. Механизм купирования пилообразных колебаний с помощью 3 МВт ИЦРН плазмы

самой конструкцией установки. Возможными способами управления термоядерной неустойчивостью являются:

- напуск газа (^3He) и изменение состава топлива, когда, например, усреднённая электронная температура преодолевает фиксированное значение;
- более низкое содержание трития приводит затем к уменьшению энергии альфа-частиц;
- если снижение мощности альфа-частиц слишком велико, используется ионно-циклотронный нагрев как средство повышения температуры, которая должна оставаться в условиях зажигания.

При этом необходимо отметить, что существует внутренняя трудность для эксперимента по ИЦРН в сценарии зажигания термоядерной реакции из-за того, что поле увеличивается с 9 до 13 Тл.

В процессе моделирования с помощью полноволнового кода TORIC в сочетании с программой SSQFП Фоккера—Планка было установлено, что:

- частота $f = 115$ МГц представляет собой хороший выбор, когда время ИЦРН $t_{\text{ICRH}} > 3$ с (завершение стадии нарастания тока и переход к плато), которое соответствует величине магнитного поля 11—13 Тл;
- для синхронизации < 3 с и полей 9—11 Тл хорошим выбором частоты будет $f = 95$ МГц;
- было показано, что профиль выделения энергии в случае $B = 11$ Тл ($t = 3$ с) и $f = 115$ МГц, нагрев на примеси ^3He (2%) имеет квазилинейный характер (см. рис. 13).

При $f = 115$ МГц в интервале магнитного поля от 11 до 13 Тл и при $f = 95$ МГц в интервале магнитного поля от 9 до 11 Тл, по сути, первая гармоника ^3He и вторая гармоника Т резонируют в центральной части плазмы в диапазоне $0 < r/a < 0,4$, это гарантирует выделение энергии в центральной части, в то время как первая и вторая гармоники D находятся вне плазмы или на самом краю (первая гармоника) на стороне высокого поля.

Поэтому для проекта Игнитор была выбрана эта схема ИЦРН (нагрев примеси через ^3He), поскольку он очень эффективно отдаёт энергию при высокой плотности плазмы и в то же время позволяет контролировать T_i путём инъекции ^3He .

На рис. 15 показано усиление мощности по типу состава топлива ($\text{Вт}/\text{см}^3$) в зависимости от r/a .

Рис. 15. Усиление мощности по типу состава топлива в зависимости от r/a , где r — текущий радиус, a — малый радиус токамака: а — D (100%)— ^3He (2%); б — D (70%)—T (28%)— ^3He (2%); в — D (50%)—T (40%)— ^3He (2%); — D; — ^3He ; — T; — электроны

На рис. 16 показана эволюция профиля выделения мощности Q_L во время нарастания поля от 11 до 13 Тл.

Рис. 16. Усиление мощности дейтерия (а) и трития (б) после столкновительного переноса (от ионов энергетической примеси ^3He к основным видам) в случае смесь D—T (50%—48%) с 2%-ной примесью ^3He : — для $B = 11$ Тл; — для $B = 12$ Тл; — для $B = 13$ Тл

Теория построения системы ИЦРН токамака Игнитор [24]. Система ИЦРН является важным компонентом эксперимента по проекту Игнитор, и были приложены все усилия для того, чтобы этот проект учёл опыт проектирования, приобретённый в самых продвинутых лабораториях. Система создана модульной и с гибкой конфигурацией, чтобы оптимизировать проникновение ВЧ-энергии в плазму в различных режимах и при широком диапазоне параметров установки. Шесть из двенадцати больших горизонтальных портов предназначены для автономных систем ИЦРН, но изначально будут установлены только четыре антенны ИЦРН (по одной антенне на порт).

Эта конфигурация будет запитываться от двух модулей, каждый из которых обслуживает две четырёхполосные антенны. Каждый модуль энергообеспечения ИЦР состоит из четырёх высокомоощных энер-

гетических генераторов, обеспечивая полную энергию 8 МВт на центральной частоте 80 МГц (по 2 МВт на генератор.) Это значение уменьшается до 4 МВт при увеличении рабочей частоты на значениях, близких к верхнему пределу полосы генератора (120 МГц). Вакуумная линия передачи энергии способна переносить 0,4 МВт на полосе при 115 МГц, оптимальной частоте при $B_T = 13$ Тл, что означает 1,6 МВт

на порт с антенной при электрическом поле в зоне вакуума ниже 5 кВ/см. Конфигурация ВЧ-модулей позволяет осуществлять полное управление фазой (тороидальная и полоидальная) петель с помощью автоподстройки частоты и управления фазой. В частности, для наиболее продвинутого эффективного сценария при D—T-импульсе ИЦРН применяется в то время, когда магнитное поле увеличивается с 9 до 13 Тл в течение начальных 4 с нарастания тока плазмы до 11 МА. Для этого требуется возможность настройки различных частот во время разряда с целью поддержания поглощающего слоя в центральной области плазменной колонны для контроля температуры плазмы и ускорить ход достижения зажигания в «расширенной конфигурации первой стенки». Ввиду того, что необходимы низкие уровни энергии, можно использовать различные антенны, настроенные на различные частоты до 115 МГц, которые оптимальны при 13 Тл. В сценарии при пониженных параметрах $B_T = 9$ Тл в конфигурации X-точки, напротив, для перехода в режим H-моды требуется поглощение полной мощности в диапазоне f_{RF} 80—95 МГц. Получены выражения положения ρ/a (в нормированной по радиусу плазме) основных резонансных гармоник водорода, дейтерия, трития и ^3He как функций магнитного поля:

$$\rho/a = A \left[15,2 \frac{N_{\text{harm}} Z_i m_p B_0 (\text{Тл})}{m_i f_{RF} (\text{МГц})} - 1 \right],$$

где A — аспектное отношение токамака $R/a = 2,8$; N_{harm} — номер гармоники; Z_i — вид зарядов; m_p/m_i — отношение масс протон/ион; B_0 — магнитное поле на оси; f_{RF} — применяемая частота.

Вообще, самый лучший сценарий ИЦРН для того, чтобы достичь эффективной скорости поглощения, — это нагрев примеси: в случае токамака Игнитор, когда малая часть ^3He (1—2%) добавлена к смеси D—T, первый путь поглощения на ионах около центра плазменной колонны очень эффективен. Оставшаяся связанная мощность затухает на электронах в диапазоне широкого радиального интервала плазменной колонны. Основная гармоника ^3He расположена в радиальном интервале $-0,5 < \rho/a < +0,5$, когда магнитное поле изменяется от 9 до 13 Тл при $f_{RF} = 115$ МГц.

Это оптимальный выбор для «сценария зажигания» на полном поле, потому что оно удовлетворяет обоим требованиям остаться в области частоты 120 МГц генераторов ВЧ-энергии, и не слишком плохая дислокация положений гармоник для различных видов ионов, чтобы избежать паразитных поглощений на краю плазмы, как показано на рис. 17 [25].

Итоги рассмотрения материалов проекта Игнитор. В рамках проекта Игнитор итальянской стороной разработан эскизный проект системы ИЦРН [26], инжектирующей энергию в диапазоне частоты 80—115 МГц с целью как ускорения зажигания, так и облегчения доступа к высоким режимам удерживания плазмы. Были рассмотрены следующие сценарии работы системы ИЦРН: 115 МГц при 13 Тл и 11 МА — полное исполнение базового сценария разряда; 80 МГц, 9 Тл, 6—7 МА — сниженное исполнение сценария разряда, длительность ВЧ-импульса до 4 с. При этом частота 80 МГц является центральной частотой выбранных генераторов и около этого значения максимальная мощность, полученная каждым генератором, составляет 2 МВт, а частота 115 МГц расположена на верхней границе по-

Рис. 17. Положение резонансного слоя как функция тороидального магнитного поля для фундаментальной, второй и третьей гармоник водорода, дейтерия и трития соответственно (1 — ●), фундаментальной ^3He и второй трития (2 — □) и фундаментальной дейтерия (3 — ○) на частоте 115 МГц. При повышении частоты линии 1, 2, 3 на рисунке будут опускаться вниз, в этом случае синяя линия имеет тенденцию выходить за пределы границы плазмы, при понижении частоты линии будут подниматься вверх, и в этом случае зеленая линия выходит за пределы границы плазмы

лосы частот генераторов и генерируемая мощность падает до 1 МВт на единицу.

Необходимость в системе ИЦРН в сценарии зажигания D—T-реакции в токамаке Игнитор обосновывается следующими причинами:

— повышение температуры плазмы в фазе подъёма тока ускоряет время зажигания термоядерной реакции, когда отклонение от «оптимальных условий», таких как наличие примесей, создающих значение $Z_{\text{эф}}$ больше 1,5, или состав топлива, отличный от 50/50% D—Т-смеси, приводит к задержке или препятствию в достижении зажигания;

— вводить дополнительный нагрев на плато максимума тока, когда необходимо воздействие или необходимо подавить пилообразные (sawtooth) колебания, которые могут быть возбуждены;

— возможный способ контролировать термоядерную нестабильность, который заключается в добавлении ^3He -примеси в D—Т-смесь и введении ИЦРН для поддержания эволюции разряда в субкритической стадии.

Для изучения поглощения ИЦРН и определения профилей поглощения мощности в плазме при нарастании внешнего магнитного поля от 11 до 13 Тл (3—5 с времени разряда) при использовании D—Т-смеси применяли программный код ICRH-TORIC, который решает полное волновое уравнение в сочетании с 2D-расчётной программой Фоккера—Планка. Полученные результаты были использованы как входные данные для транспортных кодов, таких как JETTO или PTRANSP, для изучения развития параметров плазмы во время ВЧ-импульса.

Система рассчитана на работу в полосе частот 80—120 МГц. Каждый модуль состоит из четырёх генераторов высокой мощности, энергия которых разделена на два порта (восемь петель) для того, чтобы держать максимальное электрическое поле (специально в зоне вакуумной передающей линии и петель) до 5 кВ/см. Вакуумная передающая линия с сопротивлением 30 Ом, включая проходную линию, передаёт энергию каждой петле. Конфигурация ВЧ-модулей позволяет осуществлять полный контроль фазы (тороидальной и полоидальной) на петле через управление фазовой автоподстройкой частоты. Каждый ВЧ-модуль, питающий два порта, может запитать до 3,2 МВт (на генераторе 1 МВт) на частоте $f \leq 120$ МГц (1,6 МВт на порт) и до 6,4 МВт (на генераторе 2 МВт) (3,2 МВт в порт) на более низких частотах ≥ 80 МГц. Таким образом, два модуля, распределённые по четырём портам, могут обеспечить глобальную мощность около 6,4 МВт при 120 МГц и 12,8 МВт при 80 МГц, длительность импульса 4 с, скважность 200 [27]. Для этой задачи возможно использовать ВЧ-лампу TH526 компании Thales Electron Devices (Франция): TH526A (80 МГц) и TH526B (115 МГц). Система ИЦРН основана на двух модулях и имеет следующие основные характеристики [28]:

Количество генераторов, шт. . . .	8
Количество антенн, шт. . . .	4
Диапазон частоты, МГц . . .	80—115
Генерируемая ВЧ-мощность, МВт . . .	16—8
ВЧ-мощность в плазме, МВт . . .	6,4 → 12,8
Длительность импульса, с . . .	4
Скважность . . .	1/200
Тип генератора . . .	ВЧ-тетрод
Тип антенны . . .	4-петельная

Выбор системы согласования импеданса антенны с выходным сопротивлением ВЧ-генератора.

Основываясь на данных, приведённых в [16], можно получить значения отношения поглощённой ВЧ-мощности к площади антенн для JET: $P_s = 1,18 \text{ МВт/м}^2$ для Т-сопряжения, $P_s = 0,89 \text{ МВт/м}^2$ для гибридных 3дВ-разделителей. Аналогичные вычисления ASDEX Upgrade для гибридных 3дВ-разделителей [20] $P_s = 1,0 \text{ МВт/м}^2$.

Таким образом, по результатам рассмотрения систем ИЦРН на JET и ASDEX Upgrade наиболее оптимальной является внешняя система Т-сопряжения согласования импедансов, которая была успешно интегрирована в состав ВЧ-комплекса на JET.

Принципиально важно, что система ЕСТ по сравнению с гибридными 3дВ-разделителями наиболее компактна, не используются габаритные четвертьволновые мосты и эквивалент нагрузки.

Оценка поглощённой ВЧ-мощности и технические требования к системе ИЦРН. В [27] представлен эскиз антенны с четырьмя короткозамкнутыми петлями, вакуумной передающей линии с передним и задним проходными изоляторами для системы ИЦРН токамака Игнитор, площадь антенны $\approx 0,62 \text{ м}^2$. Основываясь на результатах, полученных на JET при использовании Т-сопряжения согласования импедансов, и имея площадь антенны системы ИЦРН токамака Игнитор, можно оценить значение погло-

щённой мощности на токамаке Игнитор: для одной антенны она составит $\sim 0,73$ МВт, для четырёх антенн ~ 3 МВт.

Антенны, петли которых запитываются от одного генератора, должны находиться в соседних радиальных патрубках вакуумной камеры токамака для лучшего согласования, так как ELMы возникают не одновременно по всей длине тора [17]. Антенны должны располагаться попарно и симметрично относительно оси тора в экваториальной плоскости токамака, как на JET и ASDEX Upgrade [19].

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

Из-за малого сечения радиального патрубка 800×160 мм в токамаке Игнитор, в котором необходимо разместить четыре вакуумные передающие линии, геометрические размеры вакуумной передающей линии с волновым сопротивлением $Z_0 = 60 \ln(D/d) = 30$ Ом не могут превышать следующие размеры: внешний диаметр проводника $D = 112$ мм, внутренний диаметр проводника $d = 68$ мм.

Из-за небольшой площади антенны и малого расстояния между сепаратрисой плазмы и внешней стенкой вакуумной камеры экран Фарадея должен быть один на всю площадь антенны, обращённую к плазме, как на ASDEX Upgrade.

Разработка системы ИЦРН токамака Игнитор на большие мощности прежде всего сильно зависит от габаритных ограничений: расстояние между сепаратрисой плазмы и внешней стенкой вакуумной камеры, площадь излучающей поверхности антенны, площадь сечения вакуумной передающей линии.

ВЧ-генератор системы ИЦРН. Опыт эксплуатации систем ИЦРН на JET и ASDEX Upgrade показал хорошую работоспособность и достаточную гибкость (в случае модернизации) систем на основе ВЧ-генераторов с контролируемым внешним возбуждением [15, 16, 20]. Предполагаемый вариант исполнения такого усилителя ВЧ-мощности с тетродом (TH526A — 80 МГц, TH526B — 115 МГц) в выходном каскаде представлен на рис. 18.

Рис. 18. Структурная схема ВЧ-генератора

Каждый из двух модулей ВЧ-питания должен содержать по четыре таких отдельных канала усиления, имеющих автоматическую подстройку частоты и регулируемый сдвиг фазы выходного напряжения. С этой целью в выходном фидере усилителя, содержащем регулируемые элементы второй ступени согласования генератора и нагрузки, используется последовательность направленных ответвителей мощности. Обработка по разработанному алгоритму аналоговых сигналов проходящей и отражённой мощностей позволяет отслеживать коэффициент стоячей волны напряжения (КСВН) в фидере и формировать необходимые сигналы управления шлейфом и тромбоном для поддержания его на заданном уровне от 1 до 1,5 во время передачи энергии в нагрузку. Высокое значение КСВН (более 3) при развитии вакуумного пробоя в ВЧ-тракте используется для формирования сигнала защиты лампы от возникающих перенапряжений и кратковременного отключения усилителя. В каждом канале усиления имеется трёхкаскадный предусилитель, который содержит управляемый задающий генератор на ВЧ-транзисторах и два последовательных каскада усиления на высоковольтных тетродах. Оконечный каскад на тетроде ТН526 (А, В) выполнен по схеме однотактного усилителя с общей сеткой с входным и выходным контурами на коаксиальных линиях. Выходной каскад работает в режиме класса В (С) с углом осечки анодного тока не более 90° . Высокая собственная добротность коаксиального резонатора должна обеспечивать высокий к.п.д. нагруженного контура и общий к.п.д. выходного каскада, близкий к теоретическому пределу 78%. При этом в режиме, близком к критическому, амплитуда импульса анодного тока должна быть 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 возбудителя должна быть ниже так называемой частоты «самонейтрализации» тетрода, которая зависит как от межэлектродных ёмкостей лампы, так и от индуктивности подсоединения экранной сетки к катоду. Применение схемы с общей сеткой, помимо того, что обеспечивает устойчивую работу генератора на более высокой частоте, позволяет передавать большую часть мощности возбудителя непосредственно через проходную ёмкость в полезную нагрузку выходного каскада. Колебательная мощность в выходном контуре при постоянном анодном напряжении 24 кВ должна быть более 2 МВт (частота 80 МГц), при напряжении анода 18 кВ — более 1 МВт (частота 115 МГц). Максимальная мощность, отбираемая от источника анодного напряжения в ламповый контур, достигает в этих режимах 2,76 МВт (при 24 кВ) и 2,16 МВт (при 18 кВ). Коэффициент усиления мощности в конечном каскаде в первом варианте составляет 14,5 dB, во втором 14 dB. Коаксиальные разделительные ёмкости 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 к.п.д. резонансной системы.

Источник питания ИЦРН. Максимальная импульсная мощность, потребляемая каждой ВЧ-лампой из цепи анодного питания, составляет 2,8 МВт. Предполагается создание источника питания ВЧ-генератора, состоящего из восьми отдельных идентичных силовых модулей мощностью 2,8 МВт каждый. Каждая пара таких модулей будет обеспечивать питание двух ВЧ-усилителей и иметь общую коммутационную аппаратуру, общую систему управления, обеспечивающую их синхронную работу и совместное функционирование системы защиты. Коммутационное оборудование и системы управления пар модулей, обеспечивающих питание разных каскадов усилителей, будут индивидуальными. Такое разбиение позволит обеспечить работу каждого ВЧ-генератора независимо друг от друга, что улучшает управляемость системой питания и особенно важно для проведения наладочных и ремонтных работ.

К каждому модулю предъявляются следующие основные технические требования: максимальная выходная мощность модуля 2,8 МВт, максимальное напряжение на выходе 24 кВ, максимальный ток нагрузки 120 А, максимальная длительность импульса 4 с, скважность 200, нестабильность выходного напряжения $\pm 1\%$.

Кроме того, к источнику питания предъявляются следующие дополнительные требования: регулировка выходного напряжения от $0,2U_{\max}$, работа при изменении длительности ВЧ-импульса от 1 мс до 4 с, быстродействующая защита, предотвращающая выход из строя ВЧ-ламп, фидера и антенного контура при возникновении в них пробоев.

Сложность разработки источника питания определяется необходимостью обеспечить как импульсный режим работы с значительной скважностью $Q_{\min} = 200$ (что соответствует средней мощности ~ 10 —

12 кВт), так и работу практически в непрерывном режиме в связи с большой длительностью импульса до 4 с, т.е. при длительном потреблении мощности непосредственно от питающей электрической сети. Эти требования не позволяют использовать имеющийся в составе комплекса ТСП источник питания ВЧ-генераторов «Виктория» для задач по проекту Игнитор.

Состав и основные первоначальные работы по системе ИЦРН токамака Игнитор. Состав системы ИЦРН на токамаке Игнитор:

- антенны с экраном Фарадея, состоящие из четырёх короткозамкнутых петель;
- вакуумные передающие линии;
- система вакуумной откачки;
- внешняя система Т-сопряжения для согласования импеданса двух идентичных петель двух антенн с выходным импедансом ВЧ-генератора, состоящая из передающих линий, согласующих элементов;
- ВЧ-генераторы;
- источники питания ВЧ-генераторов;
- система охлаждения ВЧ-генераторов и источников питания;
- система управления, согласования, диагностики, сбора и обработки информации.

Основные первоначальные работы по системе ИЦРН проекта Игнитор на комплексе ТСП ТРИНИТИ:

- проведение электрических, электромеханических, тепловых расчётов узлов ИЦРН системы с использованием расчётных пакетов ANSYS или COMSOL Multiphysics;
- разработка и изготовление прототипа четырёхпетельной антенны с экраном Фарадея, вакуумной передающей линии, эквивалента нагрузки антенны;
- разработка и изготовление стенда для проведения испытаний прототипа антенны, вакуумной передающей линии, элементов передающих линий.

На стенде ИЦРН комплекса ТСП ТРИНИТИ должны быть проведены следующие исследования:

- испытания на электрическую прочность узлов антенны, вакуумной передающей линии, 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.

Для определения оптимальной фазировки петель в антенне, а также для оценки сопротивления связи с плазмой необходимо провести расчёты с использованием расчётного пакета TORIC-SSFPQL [29—31].

ВЫВОДЫ

Выполнены всесторонние аналитические исследования по состоянию ИЦРН комплекса ТСП, показана необходимость формирования нового комплекса ИЦРН, глубокой модернизации системы энергопитания и отказа от автоколебательного режима генерации волн.

Выполнен анализ физического обоснования и теоретических расчётов применения ИЦРН в проекте токамака Игнитор.

Проведён анализ результатов использования системы ИЦРН и принятых технологических решений на токамаках JET и ASDEX Upgrade. Показано, что применённые технологические решения имеют высокую эффективность и могут быть использованы для решения задачи ИЦРН в проекте токамака Игнитор применительно к площадке комплекса ТСП ТРИНИТИ.

Анализ выполненных итальянской стороной компьютерных расчётов с использованием кода TORIC-SSFPQL показал высокую эффективность и перспективность применения этого кода для дальнейшей совместной работы российских и итальянских специалистов над проектом системы ИЦРН для токамака Игнитор.

Представленные результаты выполненных исследований показали перспективность применения систем ИЦРН в токамаке Игнитор и определили пути модернизации системы ИЦРН комплекса ТСП для проекта токамака Игнитор.

Авторы выражают благодарность заместителю Генерального директора НИИЭФА им. Д.В. Ефремова Р.Ф. Курунову за поддержку проведённых исследований.

Публикация подготовлена по результатам исследований, выполненных с использованием оборудования уникальной научной установки «Комплекс установки ТСП». Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации, субсидия Минобрнауки России № 14.599.21.0001 от 29.08.2017.

REFERENCES

1. **Vdovin V.L., Zinov'ev O.A., Ivanov A.A., Kozorovitskiy L.L., Parail V.V., Rakhimbabaev Ya.R., Rusanov V.D.** Excitation of magnetoacoustic resonance in tokamak plasma. — *Pis'ma v ZhETF (Letters to JETPh)*, 1971, vol. 14, issue 4, pp. 228—231 (in Russian).
2. **Vdovin V.L., Zinov'ev O.A., Ivanov A.A., Kozorovitskiy L.L., Parail V.V., Rakhimbabaev Ya.R., Rusanov V.D., Shapotkovskiy N.V.** Magnetosonic heating of plasma in tokamak TM-1-HF. — *Pis'ma v ZhETF (Letters to JETPh)*, 1973, vol. 17, issue 1, pp. 4—7 (in Russian).
3. **Vdovin V.L., Zinov'ev O.A., Rusanov V.D., Shapotkovskiy N.V.** Cyclotron absorption of fast magnetosonic waves in the TM-1-HF tokamak at the presence of a small group of resonant ions. — *Pis'ma v ZhETF (Letters to JETPh)*, 1976, vol. 24, issue 7, pp. 410—413 (in Russian).
4. **Noterdaeme J.-M., Bobkov V.I., Bremond S. et al.** Matching to EMLy plasmas in the ICRF domain. — *Fusion Engineering and Design*, 2005, vol. 74, pp. 191—198.
5. **Wukitch S.J., Lin Y., Parisot A., Wright J.C., Bonoli P.T., Porkolab M., Basse N., Edlund E., Hubbard A., Lin L., Lynn A., Marmar E., Mossessian D., Phillips P., Schilling G.** Ion cyclotron range of frequency mode conversion physics in Alcator C-Mod: experimental measurements and modeling. — *Physics of Plasmas*, 2005, vol. 12, p. 056104.
6. **Wukitch S.J., LaBombard B., Lin Y., Lipschultz B., Marmar E., Reinke M.L., Whyte D.G., and the Alcator C-Mod Team.** ICRF Specific Impurity Sources and Plasma Sheaths in Alcator C-Mod. 18th PSI, Toledo, 2008.
7. **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.** Assessment of a Field-Aligned ICRF Antenna. — *AIP Conference Proceedings*, 1580, 2014, vol. 73, pp. 73—80.
8. **Azizov E.A. et al.** — In: *Plasma Phys. and Contr. Nucl. Fus. Res.* — Vienna: IAEA, 1981, vol. 2, p. 599.
9. **Hoffman D.J., Barber G.G.** The technology of the ion cyclotron range of frequencies. — *Fusion Technology*, 1989, vol. 15, № 2, pt. 2A, p. 719.
10. **Mirnov S.V., Kovan I.A., Azizov E.A. et al.** — In: *Proc. 16th Intern. Conf. on Fusion Energy*. Montreal, 1996. — Vienna: IAEA, 1997, vol. 1, p. 763.
11. **Kovan I.A., Monakhov I.A., Naumshin Yu.E., Pisklov A.E., Roife I.M., Seredenko E.V.** — *Plasma Devices and Operations*, 1998, vol. 6, pp. 95—101.
12. **Rodionov N.B., Azizov E.A., Alekseev A.G., Belov A.M., Krasil'nikov A.V., Markin A.I., Myslin V.A., Ivanov A.A., Petrov V.G., Rodionova V.P., Sotnikov S.M., Tugarinov S.N.** Experimental and design-theoretical study of ion cyclotron heating of hydrogen plasma on T-11M tokamak. — *Fizika plazmy (Plasma Physics)*, 2006, vol. 32, № 2, p. 101 (in Russian).
13. **Rodionov N.B., Azizov E.A., Alekseev A.G., Gudkov V.I., Krasil'nikov A.V., Myslin V.A., Ivanov A.A., Petrov V.G., Rodionova V.P., Kuznetsov E.A., Sotnikov S.M., Trapeznikov A.G., Khayrutdinov R.R., Shipuk I.Ya.** Change of discharge duration at ion cyclotron heating of plasma in tokamak T-11M. — *Fizika plazmy (Plasma Physics)*, 2007, vol. 33, № 10, pp. 1—8 (in Russian).
14. **Azizov E.A., Gostev A.A., Brykov S.I., Gurevich S.G., Ivanov V.N., Podymov A.N., Trebich V.D., Frumkin G.A., Gubin A.M., Demidov V.L., Seredenko E.V., Engel'ko V.I., Shapovalov G.V.** HF-system of auxiliary plasma heating in tokamak KTM. — *Induktsionnyi nagrev (Induction heating)*, 2011, № 1(15), pp. 28—31 (in Russian).
15. **Vrancken M., Mayoral M.-L., Blackman T. et al.** Recent ICRF developments at JET. — *Fusion Eng. Des.*, 2007, vol. 82, pp. 873—880.
16. **Monakhov I., Graham M., Blackman T. et al.** Design and operations of load-tolerant external conjugate-T matching system for the A2 ICRH antennas at JET. — *Nuclear Fusion*, July 2013, vol. 53, p. 083813.

17. **Bobkov V., Becoulet M., Blackman T. et al.** Studies of ELM toroidal asymmetry using ICRF antennas at JET and ASDEX Upgrade. — In: 31st EPS Conf. on Plasma Physics. London, EPS, 2004.
18. **Antti Salmi.** Fast ions and momentum transport in JET tokamak plasmas. — In: Espoo 2012. VTT Science 10, 71 p. + app. 75 p.
19. **Bobkov V., Aguiam D., Baruzzoet M. et al.** Progress in reducing ICRF-specific impurity release in ASDEX upgrade and JET. — Nucl. Mater. and Energy, 2017, vol. 12, pp. 1194—1198.
20. **Faugel H., Angene P., Becker W., Braun F., Bobkovetal VI.V.** The ASDEX Upgrade ICRF system: operational experience and developments. — Fusion Engineering and Design, 2005, vol. 74, pp. 319—324.
21. **Kutsch H.-J., Wesner F., Noterdaeme J.-M., Muller E.** Insulating Al_2O_3 layers ICRH antennas for ASDEX Upgrade. — Fusion Technology, 1992, pp. 569—573.
22. **Coppi B. et al.** Relevant advances of the ignitor program. — In: 34th EPS Conf. on Plasma Phys. Warsaw, Poland, 2—6 July, 2007, ECA, vol. 31F, P-1.156.
23. **Cardinali A., Bombarda F. et al.** ICRH physics in Ignitor. — In: 50th Annual Meeting of the Division of Plasma Physics. Dallas, Texas, USA, November 17—21, 2008.
24. **Coppi B. et al.** Near term perspectives for fusion research and new contributions by the Ignitor Program. — In: 25th IAEA Fusion Energy Conf. Daejeon, Republic of Korea, October 11—16, 2010, FIP OV-P2.
25. **Cardinali A.** ENEA Technical Report RT/2009/37/FUS, ENEA. Frascati, Italy, 2009.
26. **Coppi B., Airoidi A., Albanese R. et al.** — Nucl. Fusion, 2015, vol. 55, p. 053011.
27. **Sassi M., Coletti A., Mantovani S., Maggiore R., Coppi B.** — In: 50th Annual Meeting of the Division of Plasma Physics. Dallas, Texas, 17—21 November, 2008.
28. **Sassi M., Coletti A., Mantovani S., Maggiore R., Coppi B.** The ICRH System for the Ignitor experiment. — Ibid.
29. **Brambilla M.** — Plasma Phys. Contr. Fusion, 1999, vol. 41, p. 1.
30. **Brambilla M.** — Nucl. Fusion, 1994, vol. 34, p. 1121.
31. **Brambilla M., Bilato R.** — Nucl. Fusion, 2006, vol. 46, p. S387.

AUTHORS

Belov A.M. NRC “Kurchatov Institute”, pl. Akademika Kurchatova 1, 123182 Moscow, Russia; abelov@fly.triniti.ru

Getman D.V. NRC “Kurchatov Institute”, pl. Akademika Kurchatova 1, 123182 Moscow, Russia

Gostev A.A. JSC «State Research Center of Russian Federation, Troitsk Institute for Innovation and Fusion Research», ul. Pushkovykh 12, 142190 Troitsk, Moscow, Russia; Gostev@triniti.ru

Gubin A.M. NRC “Kurchatov Institute”, pl. Akademika Kurchatova 1, 123182 Moscow, Russia

Subbotin M.L. NRC “Kurchatov Institute”, pl. Akademika Kurchatova 1, 123182 Moscow, Russia; Subbotin_ML@nrcki.ru

Received 13 February 2019

Revised 15 March 2019

Accepted 26 March 2019

Problems of Atomic Science and Technology

Ser. Thermonuclear Fusion, 2019, vol. 42, issue 2, pp. 48—65