

А.Н. Сатибеков^{1,2,*} , А.Т. Кусаинов¹ , Ж. Кулан¹ , Е.А. Сәрсембаев¹ ,
Б.Ж. Чектыбаев¹ , А.В. Гулькин¹ 

¹Филиал «Институт атомной энергии» РГП НЯЦ РК, Казахстан, г.Курчатов,

²Университет имени Шакарима города Семей, Казахстан, г.Семей

*e-mail: satibekov@nnc.kz

ИССЛЕДОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ АЧХ КОНТУРА МОДУЛЯ АНТЕННОЙ СИСТЕМЫ ВЫСОКОЧАСТОТНОГО НАГРЕВА ПЛАЗМЫ ТОКАМАКА КТМ

В статье представлены результаты измерения параметров амплитудно-частотных характеристик (АЧХ) контура модуля антенной системы дополнительного высокочастотного (ВЧ) нагрева плазмы токамака КТМ в лабораторных условиях. Представлено описание антенно-фидерного устройства и ВЧ системы токамака КТМ. На данном этапе времени на токамаке КТМ проводятся пуско-наладочные работы по введению в строй ВЧ системы дополнительного нагрева. Проектировка и запуск подобной системы требуют проведения отдельных научно-исследовательских работ. Так как ВЧ система состоит из четырех модулей в состав которого входят разнообразные подсистемы и узлы, то перед испытанием всей ВЧ системы в сборе, необходимо проведение работ по проверке и определению параметров отдельных узлов ВЧ системы. Антенный модуль входит в состав антенно-фидерного устройства и является очень важным элементом во ВЧ системе, так как именно он осуществляет передачу энергии от генератора в плазму токамака, таким образом, осуществляя нагрев плазмы. В случае, если передающая система не будет согласована на заявленную рабочую частоту, то ВЧ система будет рассогласованной, что повлияет на эффективность нагрева плазмы и работу всей ВЧ системы в целом. Без ввода в эксплуатацию системы дополнительного ВЧ нагрева плазмы невозможен вывод токамака КТМ на номинальные заявленные мощности. К антенному модулю прилагаются дополнительные элементы, влияние которых также необходимо изучить для корректной работы всей ВЧ системы в будущем. В данной работе приведены методика измерения АЧХ модуля антенного и результаты определения рабочих параметров модуля антенного таких как: волновое сопротивление, индуктивность, ёмкость, резонансная частота и добротность контура модуля антенного в зависимости от различных дополнительных элементов подстройки индуктивности.

Ключевые слова: колебательный контур, амплитудно-частотная характеристика (АЧХ), модуль антенный, фидер, ионно-циклотронный резонанс (ИЦР), высокочастотный (ВЧ).

А.Н. Сатибеков^{1,2,*}, А.Т. Кусаинов¹, Ж. Құлан¹, Е.А. Сәрсембаев¹,
Б.Ж. Чектыбаев¹, А.В. Гулькин¹

¹ҚР ҰҰО РМК «Атом энергиясы институты» филиалы, Қазақстан, Курчатов қ.

²«Семей қаласының Шәкәрім атындағы университеті» КеАҚ, Қазақстан, Семей қ.

*e-mail: satibekov@nnc.kz

КТМ токамагы плазмасының жоғары жиілікті қыздыру жүйесінің антенналық модулі контурының АЖС параметрлерін зерттеу

Мақалада КТМ токамагы плазмасының қосымша жоғары жиілікті (ЖЖ) қыздыру жүйесінің антенналық модулі контурының амплитудалық-жиіліктік сипаттамаларының (АЖС) параметрлерін зертхана жағдайларында өлшеу нәтижелері ұсынылған. КТМ токамагының антенналық-фидерлік құрылғысы мен ЖЖ жүйесінің сипаттамасы ұсынылған. Уақыттың осы кезеңінде КТМ токамагында қосымша қыздырудың ЖЖ жүйесін қатарға қосу бойынша іске қосып-баптау жұмыстары жүргізілуде. Мұндай жүйені жобалау және іске қосу жекелеген ғылыми-зерттеу жұмыстарын жүргізуді талап етеді. ЖЖ жүйесі құрамына түрлі кіші жүйелер мен тораптар кіретін төрт модульден тұратындықтан, барлық ЖЖ жүйесін жинақта сынамас бұрын ЖЖ жүйесінің жеке тораптарының параметрлерін тексеру және анықтау бойынша жұмыстарды жүргізу қажет. Антенналық модуль антенналық-фидерлік құрылғының

құрамына кіреді және ЖЖ жүйесіндегі ең маңызды элемент болып табылады, өйткені ол генератордан токамак плазмасына энергия тасымалдауды жүзеге асырады, осылайша плазманы қыздырады. Егер таратушы жүйе мәлімделген жұмыс жиілігіне келісілмеген болса, онда ЖЖ жүйесі үйлесімсіз болады, бұл плазманы қыздыру тиімділігіне және тұтастай барлық ЖЖ жүйесінің жұмысына әсер етеді. Плазманың қосымша ЖЖ қыздыру жүйесін пайдалануға енгізбей, КТМ токамагын мәлімделген номиналды қуатқа шығару мүмкін емес. Антенналық модульге қосымша элементтер қосылады, болашақта бүкіл ЖЖ жүйесінің дұрыс жұмыс істеуі үшін олардың әсерін зерттеу қажет. Бұл жұмыста антенналық модульдің АЖС өлшеу әдістемесі және антенналық модульдің жұмыс параметрлерін анықтау нәтижелері келтірілген, мысалы: толқынды кедергі, индуктивтілік, сыйымдылық, индуктивтілікті реттеудің әртүрлі қосымша элементтеріне байланысты антенналық модуль контурының сапалылығы мен резонанстық жиілігі.

Түйін сөздер: тербелмелі контур, амплитудалық-жиіліктік сипаттама (АЖС), антенналық модуль, фидер, иондық-циклотрондық резонанс (ИЦР), жоғары жиілікті (ЖЖ).

A.N. Satibekov^{1,2,*}, A.T. Kusainov¹, J. Kulan¹, Ye.A. Sarsembayev¹,
B.J. Chektybayev¹, A.V. Gulkin¹
¹“Institute of Atomic Energy” Branch RSE NNC RK, Kazakhstan, Kurchatov
²Semey Shakarim University, Kazakhstan, Semey
*e-mail: satibekov@nnc.kz

Research of the frequency response parameters of antenna module circuit of the high frequency heating system of KTM tokamak plasma

The article presents the results of measuring the parameters of the amplitude-frequency characteristics (AFC) of the antenna module circuit of the system for additional high frequency (HF) heating of the KTM tokamak plasma in laboratory conditions. A description of the antenna-feeder device and the HF system of the KTM tokamak is presented. At this stage of time, commissioning works for launching of the HF system of additional heating are performed at the KTM tokamak. The design and launch of such system requires conducting of separate research. Since the HF system consists of four modules, which includes various subsystems and components, before testing the entire HF system as an assembly, it is necessary to check and determine the parameters of individual components of the HF system. The antenna module is a part of the antenna-feeder device and is a very important component in the HF system, because it transfers energy from the generator to the tokamak plasma, thus heating the plasma. In case if the transmitting system does not match the declared operating frequency, HF system will be mismatched, which will affect the efficiency of plasma heating and operation of the entire HF system. It is impossible to bring the KTM tokamak to the nominal declared power without putting into operation of the system for additional HF heating of the plasma. Additional components are attached to the antenna module, the influence of which must also be studied for the correct operation of the entire HF system in the future. This paper presents a method for measuring the frequency response of the antenna module and the results of determining the operating parameters of the antenna module such as: wave impedance, inductance, capacitance, resonant frequency and quality factor of the antenna module circuit, depending on various additional inductance adjustment elements.

Key words: oscillatory circuit, amplitude-frequency characteristic (AFC), antenna module, feeder, ion-cyclotron resonance (ICR), high frequency (HF).

Введение

На ранних стадиях исследований токамаков стало понятно, что омический нагрев не позволит получить плазму с термоядерной температурой, так как с ростом температуры эффективность такого нагрева снижается. В связи с этим начались поиски различных способов дополнительного нагрева плазмы. Одним из

способов дополнительного нагрева плазмы является ввод высокочастотной (ВЧ) мощности на частоте ионно-циклотронного резонанса (ИЦР) [1, 2]. Его планируется реализовать на токамаке КТМ с помощью, специально разработанной ВЧ системы.

ВЧ система токамака КТМ построена по принципу автоколебательной схемы на основе мощных генераторных триодов. ВЧ система

представляет собой сложное радиоэлектронное устройство, без которого невозможно получение требуемых характеристик плазмы на токамаке КТМ. Сама по себе система во многом оригинальна и не имеет аналогов по вводимой мощности (четыре генератора по 2 МВт). Поскольку ввод дополнительной мощности для нагрева плазмы будет происходить на частоте ИЦР с применением ВЧ генератора, собранного по автоколебательной схеме, то настройка на частоту резонанса должна быть выполнена для всех элементов схемы. Таким образом, успешная реализация нагрева плазмы на частоте ИЦР возможна при тщательной наладке всех элементов системы ВЧ нагрева. Важным элементом системы является антенно-фидерное устройство.

Амплитудно-частотные характеристики антенного модуля, как устройства непосредственно обращённого к плазме, в дальнейшем определяют эффективность настройки на необходимую резонансную частоту и устойчивую работу всей системы в целом. ВЧ система дополнительного нагрева плазмы представляет собой сложную распределённую цепь, состоящую из двух параллельных резонансных контуров (анодный контур и контур антенны) связанных резонансным фидером. Условием эффективной работы ВЧ системы является настройка контура в резонанс с частотой возбуждающего напряжения, поэтому для настройки ВЧ системы необходимо знать параметры элементов анодного и антенного контура.

Поэтому с целью подготовки к вводу в эксплуатацию, пробным включениям всей системы поставлены задачи по исследованию волновых свойств антенного модуля, а именно определение амплитудно-частотных характеристик (АЧХ) для выяснения готовности элементов системы к работе с заданными режимами. Подобные измерения АЧХ не производились ранее, и результаты данной работы будут использованы в последующей работе системы.

Общее описание системы, материалы и оборудование для исследований

Система ВЧ нагрева плазмы предназначена для ввода энергии и нагрева плазмы в вакуумной камере и построена на принципе автогенерации колебаний в сложной распределительной цепи и состоит из нескольких элементов, образующих единый комплекс.

Подробно система описана в источнике [3], остановимся на наиболее важных её элементах, необходимых для решения поставленных задач.

В состав ВЧ комплекса входят компактная модульная резонансная антенна, коаксиальные фидеры, ВЧ генератор, источник высоковольтного анодного питания, система диагностики и управления.

В составе комплекса дополнительного ВЧ нагрева плазмы токамака КТМ предусмотрено четыре идентичных системы – генератора. В соответствии с проектом каждый генератор имеет следующие рабочие параметры: выходная мощность – 2 МВт; рабочая частота – $13 \pm 0,5$ МГц; длительность импульса – ≤ 5 с. Таким образом, полная выходная мощность ВЧ комплекса составляет 8 МВт. На рисунке 1 приведена схема одного модуля ВЧ системы токамака КТМ, состоящего из ВЧ генератора и антенно-фидерного устройства.

Антенно-фидерное устройство состоит из модуля антенного и системы транспортировки ВЧ мощности (фидера). Модуль антенный предназначен для возбуждения на периферии плазменного шнура быстрых магнитозвуковых волн, распространяющихся в центральные области плазмы и передающих свою энергию частицам. Модуль антенный представляет собой низкоимпедансный симметричный колебательный контур, состоящий из излучающей петли и плоского вакуумного малоиндуктивного конденсатора. Эквивалентная электрическая схема антенного модуля представлена на рисунке 2. Противоположные концы петли возбуждаются противофазно. Контур модуля антенного имеет собственную рабочую частоту и имеет симметричный ввод. Предусмотрена возможность подстройки частоты без нарушения вакуума на $\pm 0,5$ МГц. Конденсатор выполнен из набора пластин и рассчитан на двойное напряжение ($\sim 40 \div 50$ кВ). Подстройка частоты осуществляется изменением емкости конденсаторного блока на кожух посредством перемещения двух заземленных пластин. Конденсатор располагается внутри герметичного кожуха, имеющего самостоятельную откачку до давления 10^{-5} торр отдельным вакуумным насосом через узел откачки с диэлектрической развязкой на 1 кВ. Петля и кожух конденсатора конструктивно объединены в съёмный единый модуль антенный, который после ввода в эксплуатацию ВЧ системы будет расположен внутри радиального патрубка камеры токамака. Такая конструкция позволяет значительно уменьшить волновое сопротивление контура модуля антенного и тем самым увеличить ток при

приемлемой величине входного ВЧ напряжения. Модуль антенный не имеет традиционного экрана Фарадея, что значительно упрощает его конструкцию [4]. Роль электростатического экрана выполняет плазма, заключенная между двумя боковыми лимитерами. Поверхность центрального проводника, обращенная к плазме, облицовывается пластинами из BN толщиной 2 мм. Подвод высокочастотной мощности к двум вводам петли модуля антенного выполняется на основе герметичных проходных керамических изоляторов, установленных на несущем фланце кожуха вакуумного конденсатора. Для защиты петли контура модуля антенного от бомбардировки частицами, двигающимися вдоль магнитного поля токамака, сбоку установлены

графитовые лимитеры. Обратные токи по элементам лимитеров приводят к уменьшению индуктивности контура модуля антенного и тем самым к увеличению резонансной частоты, а также к появлению дополнительных потерь.

Для исследования влияния боковых лимитеров параметры контура модуля антенного должны измеряться как с боковыми лимитерами, так и без них. К модулю антенному также прилагаются дополнительные элементы для уменьшения индуктивности, которые можно установить в МА при необходимости. Система транспортировки ВЧ мощности (фидер) также, как и модуль антенный является составной частью высокочастотной системы токамака КТМ.

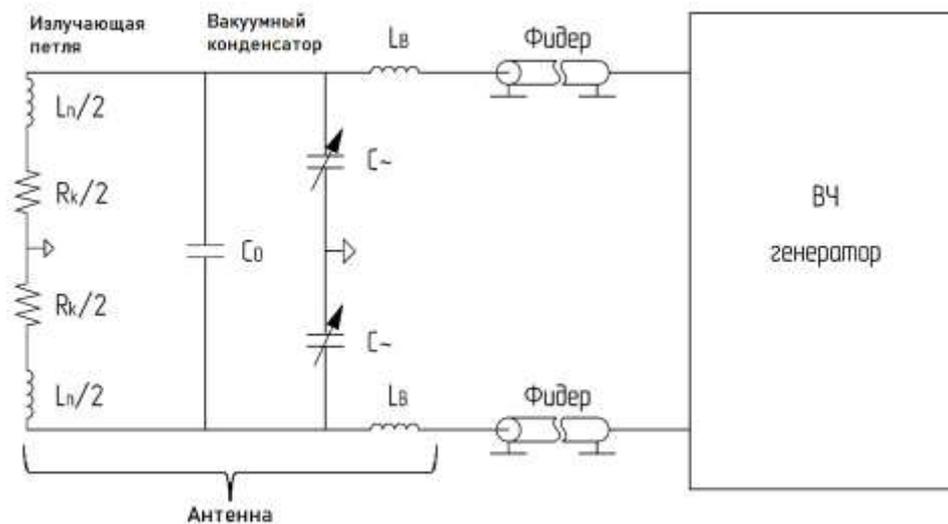


Рисунок 1 - Схема модуля ВЧ системы

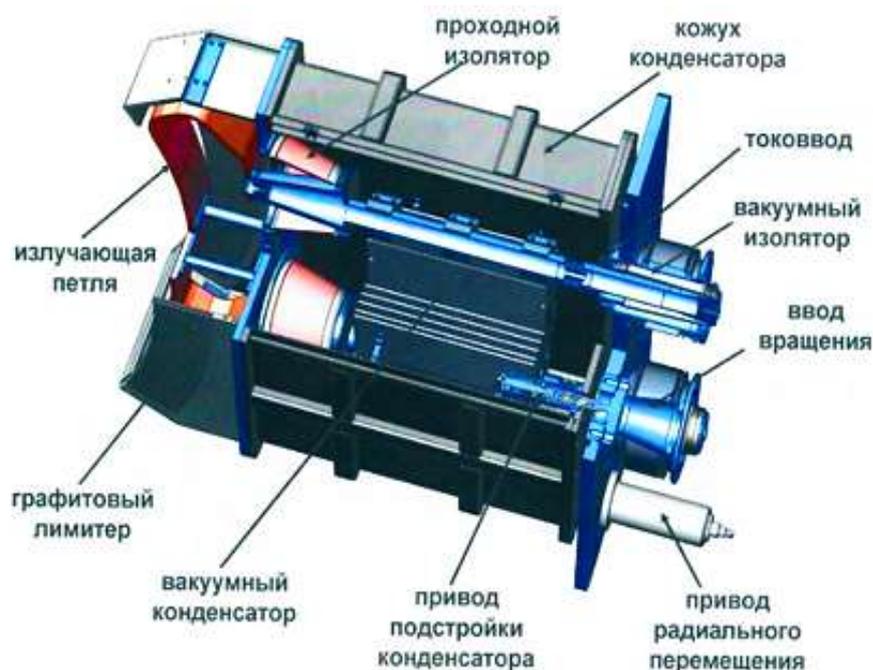


Рисунок 2 - Общий вид модуля антенного

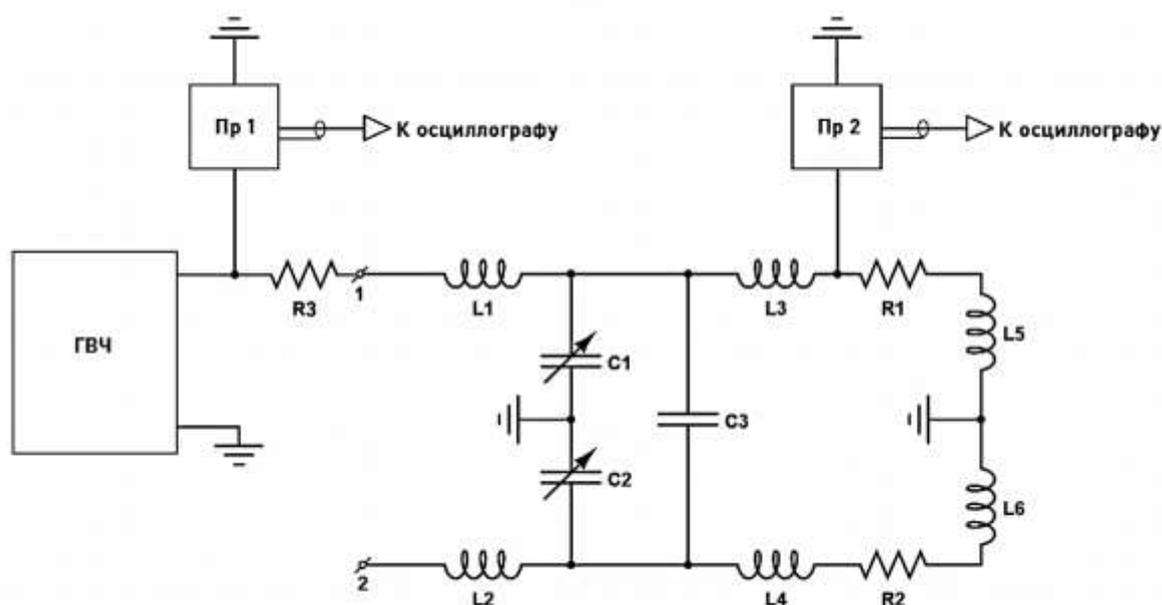
Для транспортировки высокочастотной энергии от ВЧ генераторов к антеннам применяются четвертьволновые коаксиальные фидера в виде 8 вакуумных трубопроводов. Каждый из фидеров имеет узлы сопряжения и гальванической развязки с выходами ВЧ генераторов и входами модулей антенн, каналы транспортировки ВЧ мощности, высоковольтные делители напряжения для измерения напряжений, подставки с юстировочными устройствами, обеспечивающими возможность сопряжения конструкции фидера с модулями антенн и ВЧ генераторов. Геометрическая длина фидера выбрана кратной четверти длины волны в нем, что позволяет обеспечить стабилизацию рабочей частоты генератора при изменении параметров нагрузки [5]. В совокупности с антенным модулем транспортная система образует антенно-фидерное устройство.

Технические характеристики фидера: рабочее давление – 10^{-5} торр; волновое сопротивление – 20 Ом; рабочая частота – $13 \pm 0,5$ МГц; геометрическая длина порядка $1/4$ длины волны излучения, генерируемого генератором.

Измерение параметров АЧХ модуля антенного

Измерение АЧХ и исследование параметров проводилось с известным подходом через настройку контуров на резонансную частоту и последующего расчёта всех искомых параметров [6]. Для проведения измерений электрических параметров и определения АЧХ использовались: RLC метр – измеритель индуктивности /емкости /сопротивления MS5308 LCRTESER, ГВЧ – генератор высоких частот JDS6600, для регистрации и измерения использовался осциллограф LeCroyPP010. Все результаты проведённых измерений ёмкости, сопротивления, индуктивности и т.д. сведены в таблицу.

Для измерения емкости модуля антенного демонтировалась излучающая петля, после чего при помощи RLC метра определялась емкость вакуумного конденсатора. Емкость измерялась для двух крайних положений подстроечных конденсаторов. Контур модуля антенного возбуждался генератором высокочастотных сигналов ГВЧ относительно одного из вводов и корпуса антенны (рисунок 3).



ГВЧ – генератор высоких частот JDS6600; L1, L2 – индуктивности штоков; L3, L4 – индуктивности вакуумного ввода; L5, L6 – индуктивности петли антенного модуля; C1, C2, C3 – контурные конденсаторы; R1, R2 – сопротивления, обусловленные омическими потерями в контуре и сопротивлением излучения; R3 – развязывающее сопротивление; Пр1, Пр2 – пробники измерителя напряжения LeCroyPP010.

Рисунок 3 - Эквивалентная электрическая схема определения резонансной частоты модуля антенного

Для исключения влияния импеданса контура на работу генератора возбуждения, он подключается через балластное сопротивление $R_3 = 211$ кОм. Высокочастотный сигнал на контуре антенного модуля измеряется пробниками напряжения Пр1, Пр2, подключенными на входы осциллографа.

Резонансную частоту МА определяли визуально на осциллограмме по амплитуде выходного сигнала. Для определения добротности использовали построение графика амплитудно-частотной характеристики [6]. В нашем случае это график зависимости выходного напряжения от частоты подаваемого сигнала. На графике АЧХ выбирались три частоты: f – резонансная частота, f_1 и f_2 частоты, при которых, соотношение напряжения или тока к напряжению или току при резонансе $1/A$

$$Q_{\text{изм}} = \frac{f}{f_2 - f_1} \sqrt{A^2 - 1},$$

Расстройка контура производилась до понижения амплитуды до уровня 0,707 от резонансного значения, при котором

$$A^2 = 2 \text{ и } Q_{\text{изм}} = \frac{f}{f_2 - f_1}. \quad (1)$$

По аналогичной схеме, примененной для определения резонансной частоты, был построен график АЧХ (рисунок 4) для модуля антенного в исходной конфигурации настроенного на минимальную ёмкость подстроечного конденсатора $C_{\text{min}} = 417$ пФ. Из графика АЧХ видно, что резонансная частота f равна 12,29 МГц, а частоты, соответствующие 0,707 от амплитуды резонанса равны $f_1 = 12,265$ МГц и $f_2 = 12,319$ МГц. Исходя из этих данных по формуле (1) находили добротность контура модуля антенного на резонансной частоте 12,29 МГц:

$$Q_{\text{изм}} = \frac{12,29 \text{ МГц}}{12,319 \text{ МГц} - 12,265 \text{ МГц}} = 22,75.$$

Как видно добротность модуля антенного удовлетворяет условию стабильности автоколебаний, а это значение $Q \geq 10 \div 15$ [7].

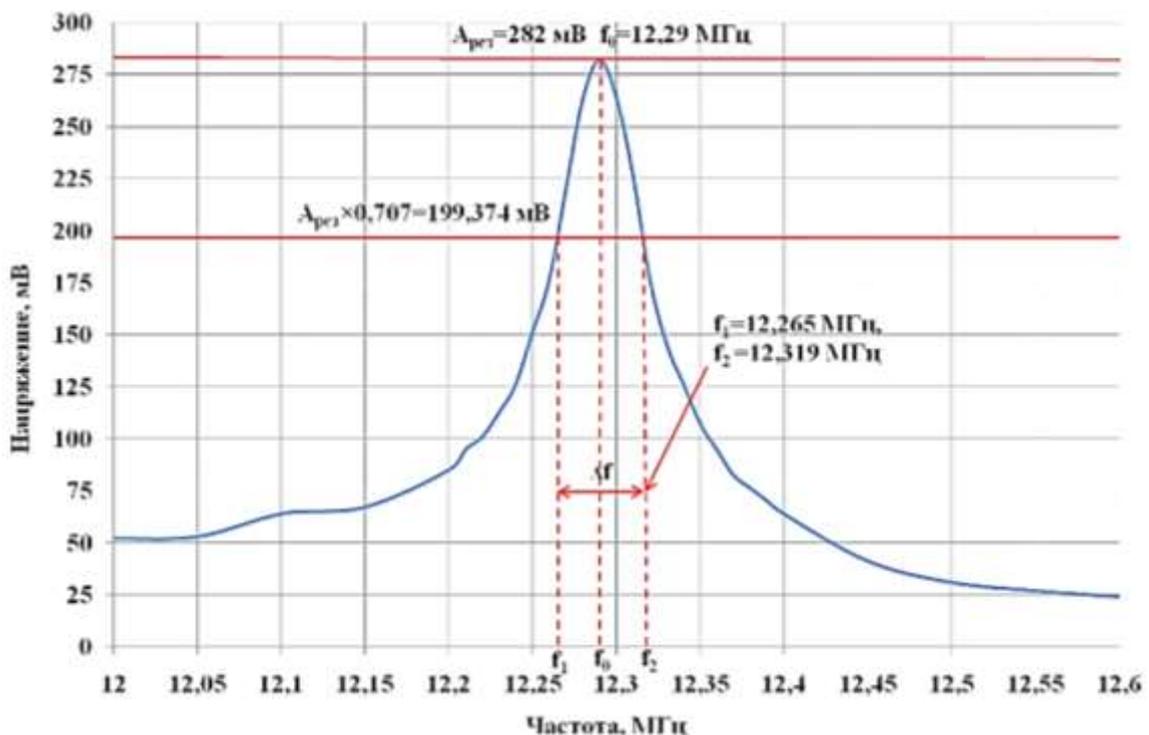


Рисунок 4 - График АЧХ

Индуктивность определяли расчётом по проведённым измерениям ёмкостей C и резонансных частот F при помощи формулы

Томсона, математического выражения связывающего собственную частоту, индуктивность и ёмкость электрических или

электромагнитных колебаний в электрическом колебательном контуре [8]

$$L = \frac{1}{4\pi^2 F^2 C}, \quad (2)$$

где L – индуктивность, F – резонансная частота, C – ёмкость, T – период.

Волновое сопротивление является одной из основных характеристик колебательного контура, которая определяется параметрами его реактивных элементов. Для расчёта волнового сопротивления ρ обычно используют следующее уравнение [9]

$$\rho = \sqrt{\frac{L}{C}}. \quad (3)$$

Путём несложных преобразований формула для волнового сопротивления примет вид

$$\rho = \frac{1}{2\pi FC}. \quad (4)$$

Для нахождения значений индуктивности и волнового сопротивления использовались значения ёмкости и частоты из таблицы 1. Результаты вычислений приведены в этой же таблице.

Таблица 1 – Результаты вычисления индуктивности и волнового сопротивления МА

Ёмкость C , пФ	$C_{min} = 417$	$C_{max} = 465$
Частота F , МГц	12,29	11,6
Индуктивность L , нГн	402,00	404,0
Волновое сопротивление ρ , Ом	31,07	29,5

Как видно из таблицы, изменение ёмкости при помощи подстроечных конденсаторов мало влияет на значение индуктивности в отличие от влияния ёмкости на значения резонансной

частоты модуля антенного, так индуктивность в случае выше колеблется в пределах 2нГн. Также, как и в случае с индуктивностью изменение ёмкости антенного модуля имеет малое влияние на значение волнового сопротивления. Таким образом диапазон колебания волнового сопротивления в зависимости от изменения ёмкости подстроечного конденсатора составляет порядка 1,5 Ом.

Результаты и обсуждение

В результате проведенных работ были осуществлены эксперименты по определению параметров модуля антенного с добавлением дополнительных элементов к исходной конструкции, таких как: медная стойка, вставка, колпак и боковые лимитеры. Дополнительные элементы предназначены для уменьшения индуктивности и защиты от тепловых нагрузок со стороны плазмы. Лимитеры представляют собой пластины из графита, которые защищают петлю от потоков плазмы (частиц) в вакуумной камере и наличие их в конструкции МА обязательно. Остальные элементы подбираются опытным путём для получения необходимых параметров работы модуля антенного. Результаты измерений представлены в таблице 3.

Варианты измерений модульной антенны:

1. Исходная конструкция модуля антенного (без колпака);
2. Исходная конструкция с добавлением медной стойки и колпака;
3. Исходная конструкция с добавлением медной стойки, колпака и вставки;
4. Исходная конструкция с добавлением боковых лимитеров;
5. Исходная конструкция с добавлением медной стойки, колпака и лимитера;
6. Исходная конструкция с добавлением медной стойки, колпака, вставки и лимитера.

Таблица 2 – Результаты определения параметров МА

Варианты конфигурации МА №	C_{min}/C_{max} , пФ	L_{min}/L_{max} , нГн	F_{max}/F_{min} , МГц	ρ_{max}/ρ_{min} , Ом	Q_{max}/Q_{min}
1	417/465	402/404	12,29/11,60	31,07/29,5	227,5/241,6
2	417/465	385/387	12,55/11,86	30,4/28,87	216,37/219,6
3	426/474	365/369	12,75/12,03	29,31/27,9	250/261,5
4	417/465	370/372	12,80/12,09	29,8/28,30	62,4/63,6
5	417/465	357/360	13,03/12,30	29,3/27,80	69,3/71,09
6	426/474	338/342	13,25/12,50	28,2/26,80	62,1/70,8

Значение ёмкости МА без вставки составляет $C_{min}/C_{max} = 417/465$ пФ и диапазон регулировки 48 пФ, вставка увеличивает ёмкость на 9 пФ и не влияет на диапазон регулировки.

Наличие боковых лимитеров приводит к уменьшению индуктивности МА в среднем на $\langle \Delta L \rangle = 28$ нГн и добротности в 3-4 раза, а также к увеличению резонансной частоты в среднем на $\langle \Delta F \rangle = 0,48$ МГц.

Дополнительные элементы для уменьшения индуктивности увеличивают значение резонансной частоты в среднем на $\langle \Delta F \rangle = 0,44$ МГц.

Можно заметить, что, дополнительные элементы и боковые лимитеры вносят примерно одинаковый вклад в изменение резонансной частоты. Добавление медной вставки к исходной конструкции МА для изменения индуктивности приводит к изменению ёмкости вакуумного конденсатора, это может быть связано с более близким расположением вставки к пластинам конденсатора. Проектная рабочая частота в 13 МГц, что соответствует циклотронной частоте водорода на радиусе около 0,9 м [10], достигается при помощи включения в конструкцию МА всех дополнительных элементов.

Добротность в каждом из случаев удовлетворяет условию стабильности автоколебаний, т.е. имеет значение $Q \geq 10$. Волновое сопротивление согласуется с данными статьи приведенной в [3] и имеет значение порядка 29 Ом.

Как видно из представленных результатов, электрические цепи антенного модуля в собранном виде позволяют провести

необходимую подстройку параметров и получить требуемые значения для работы в составе генераторов ВЧ-системы нагрева плазмы, а именно: резонансную частоту, добротность и т.д.

Заключение

Проведены экспериментальные работы по определению параметров АЧХ контура модуля антенного и диапазона их регулировок в различных конфигурациях. По результатам измерений был определен диапазон резонансных частот контура МА в зависимости от ёмкости вакуумного конденсатора и при добавлении дополнительных элементов подстройки индуктивности (стойка, колпак, вставка), а также с учётом наличия лимитеров. Результаты измерений позволяют утверждать, что происходящее изменение резонансной частоты при изменении параметров электрических цепей антенного модуля находятся в допустимых интервалах подстройки на требуемую резонансную частоту. Добротность и другие параметры антенного модуля удовлетворяют требуемым условиям стабильности работы автоколебательной системы генератора. Анализ АЧХ электрических цепей антенного модуля в собранном виде свидетельствует о возможности провести необходимую подстройку параметров и получить требуемые значения для работы в составе генераторов ВЧ-системы нагрева плазмы, а именно: резонансную частоту, добротность и т.д.

Литература

- 1 Глухих В.А., Беляков В.А., Минеев А.Б. Физико-технические основы управляемого термоядерного синтеза. - СПб.: Издательство Политехнического ун-ета, 2006. – 348 с.
- 2 Белов А.М., Гетман Д.В., Гостев А.А., Губин А.М., Субботин М.Л. Цели модернизации системы ИЦР-нагрева плазмы установки ТСП ТРИНИТИ под задачи проекта ИГНИТОР // ВАНТ Серия Термоядерный синтез, 2019. – Т. 42, вып. 2. – С.48-65.
- 3 Азизов Э.А., Гостев А.А., Брыков С.И., Гурьевич С.Г., Иванов В.Н., Подымов А.Н., Требич В.Д., Фрумкин Г.А., Губин А.М., Демидов В.Л., Середенко Е.В., Энгелько В.И., Шаповалов Г.В. ВЧ система дополнительного нагрева плазмы токамака КТМ // Индукционный нагрев. – 2011. – № 1(15). – С.28-31.
- 4 Van Nieuwenhove, R., Koch R. Comparison of the performance of ICRF antennas with and without Faraday shield on TEXTOR // Nucl. Fus. – 1992. – Vol.32, No 11. – P.1913.
- 5 Кован И.А., Родионова Н.Б. Родионова В.П. Ввод ВЧ-мощности в плазму токамака при ионно-циклотронном нагреве // Сборник трудов ОНТИ ГНЦ РФ ТРИНИТИ. – 2003. – Вып.2. – С.92-108.
- 6 ИАЭ. Методика испытаний антенного модуля системы дополнительного ВЧ нагрева плазмы токамака КТМ в лабораторных условиях. – Курчатов: Филиал ИАЭ РГП НЯЦ РК, Методика №17-280-01/151 от 25 июня 2021.
- 7 Азизов Э.А., Велихов Е.П., Тажибаева И.Л., Школьник В.С., Минеев А.Б., Филатов О.Г., Пивоваров О.С., Тухватулин Ш.Т., Шестаков В.П. Казахстанский материаловедческий токамак КТМ и вопросы управляемого термоядерного синтеза. – Алматы: НЯЦ РК, 2006. – 236 с.
- 8 Сивухин Д. В. Общий курс физики Т.III. Электричество. – Москва: Физматлит, 2020. – 688 с.

- 9 Калашников А.М. Основы радиотехники и радиолокации: колебательные системы. - М.: Воениздат, 1965. – 384 с.
- 10 Бреев В.В., Родионов Н.Б., Родионова В.П., Мальцев С.Г. Сценарии ИЦР-нагрева в токамах Т-11М, КТМ. // Сборник трудов ОНТИ ГНЦ РФ ТРИНИТИ. – 2004. – Вып.3. – С. 179-182.

References

- 1 V.A. Gluhih, V.A. Beljakov and A.B. Mineev, Fiziko-tehnicheskie osnovy upravljaemogo termojadernogo sinteza (SPb, 2006), p. 348. (in Russ).
- 2 A.M. Belov, D.V. Getman, A.A. Gostev, et al, VANT Serija Termojadernyj sintez, 42(2), 48-65 (2019). (in Russ).
- 3 Je.A. Azizov, A.A. Gostev, S.I. Brykov, et al, Indukcionnyj nagrev, 1(15), 28-31 (2011). (in Russ).
- 4 R. Van Nieuwenhove, R. Koch, et al, Nucl. Fus., 32(11), 1913 (1992).
- 5 I.A. Kovan, N.B. Rodionov and V.P. Rodionova, Sbornik trudov ONTI GNC RF TRINITI, 2, 92-108 (2003). (In Russ).
- 6 IAE NNC RK, Metodika ispytanij antennogo modulja sistemy dopolnitel'nogo VCh nagreva plazmy tokamaka KTM v laboratornyh uslovijah (Kurchatov, 2021). (In Russ).
- 7 Je.A. Azizov, E.P. Velihov, I.L. Tazhibaeva, et al, Kazahstanskij materialovedcheskij tokamak KTM i voprosy upravljaemogo termojadernogo sinteza (Almaty, 2006), p. 236. (in Russ).
- 8 D.V. Sivuhin, Obshhij kurs fiziki T.III. Jelektrichestvo (Moscow, 2020), p. 688. (in Russ).
- 9 A.M. Kalashnikov, Ja.V. Stepuk, Osnovy radiotekhniki i radiolokacii: kolebatel'nye sistemy (Moscow, 1965), p. 384. (in Russ).
- 10 V.V. Breev, N.B. Rodionov, V.P. Rodionova, Sbornik trudov ONTI GNC RF TRINITI, 3, 179-182 (2004). (in Russ).