

<https://doi.org/10.52676/1729-7885-2025-3-183-191>
УДК 621.039.643

ИСПЫТАНИЕ ВЧ-ГЕНЕРАТОРА СИСТЕМЫ ИЦР НАГРЕВА ПЛАЗМЫ ТОКАМАКА КТМ НА ЭКВИВАЛЕНТ АКТИВНОЙ НАГРУЗКИ

А. В. Гүлкин^{1*}, К. Женис², Б. Ж. Чектыбаев², А. Т. Кусаннов², В. И. Савкин², С. В. Котов²,
Д. Б. Зарва¹, С. А. Мукенева¹, Е. А. Кашикбаев², Д. А. Ольховик², А. М. Губин³, Д. В. Гетман³

¹ РГП «Национальный ядерный центр Республики Казахстан», Курчатов, Казахстан

² Филиал «Институт атомной энергии» РГП НЯЦ РК, Курчатов, Казахстан

³ Научно-исследовательский институт электрофизической аппаратуры им. Д.В. Ефремова,
Санкт Петербург, Россия

* E-mail для контактов: gulkin@nnc.kz

На большинстве токамаков для получения необходимых параметров плазмы таких как температура, время удержания и т.д. применяется дополнительный нагрев или дополнительный ввод мощности. Это позволяет решать актуальные научные задачи и проводить современные исследования. На токамаке КТМ дополнительный ввод мощности в плазму проектом предусмотрено реализовать с помощью ионно-циклотронного нагрева. Система дополнительного нагрева плазмы на КТМ состоит из четырех одинаковых высокочастотных генераторов по 2 МВт каждый. Других систем ввода дополнительной мощности и нагрева плазмы на токамаке КТМ не предусмотрено. Перед использованием таких систем в штатном режиме проводят отладочные работы и испытания с подключением эквивалентов нагрузки. В статье представлен расчет эквивалента активной нагрузки. По результатам расчёта определены форма и геометрические размеры, при которых обеспечивается поглощение до 300 кВт высокочастотной мощности. Определены габариты и основные параметры конструкции эквивалента нагрузки для системы дополнительного ВЧ нагрева плазмы токамака КТМ. Расчёты проводились исходя из допущения, что наиболее предпочтительным является создание эквивалента нагрузки в виде резонатора с поглотителем из солевого водного раствора. Также представлены экспериментальные результаты отладочных работ с использованием разработанного эквивалента активной нагрузки. Показано, что с разработанным эквивалентом нагрузки можно успешно выполнить необходимые испытания и настройки мощного генератора, подготовить систему ввода дополнительной мощности на токамаке КТМ к дальнейшим отладочным работам и включению на плазменную нагрузку.

Ключевые слова: токамак, КТМ, ионно-циклотронный нагрев, модуль антенный, эквивалент плазменной нагрузки.

ВВЕДЕНИЕ

Одним из важных направлений исследований в реализации сценария управляемого термоядерного синтеза остаётся выбор материалов первой стенки токамака, и их испытание в условиях воздействия тепловых нагрузок. Токамак КТМ специально создан для таких исследований [1–3] и успешно запущен в Республике Казахстан.

Исследования поведения кандидатных материалов первой стенки и дивертора на токамаке КТМ возможны при достижении номинальных параметров плазмы – температуры, длительности и т.д. Сценарий получения плазмы на токамаке КТМ для изучения поведения материалов включает этапы пробоя, омического и дополнительного нагрева. Дополнительный нагрев позволит получить высокотемпературную плазму с необходимыми параметрами для изучения поведения материалов: ток плазмы 750 кА, длительность 5 с. На токамаке КТМ дополнительный нагрев плазмы предусмотрен через ввод мощности в диапазоне частот ионно-циклотронного резонанса с помощью четырёх генераторов на мощных триодах ГУ-98АМ. В каждую такую систему входят: модуль антенный, работающий на базовой частоте

13,0±0,5 МГц, канал транспортировки ВЧ мощности (фидер) и ВЧ генератор мощностью 2 МВт [4]. В настоящее время ведутся работы по испытаниям и подготовке к вводу в эксплуатацию этой системы на токамаке КТМ [5].

Высокочастотные генераторы на мощных триодах давно известны и успешно эксплуатируются. Триоды ГУ-98АМ специально разработаны для работы в системе дополнительного нагрева плазмы токамака КТМ и по ряду важных характеристик аналогов не имеют. На сегодняшний день опыта ввода в эксплуатацию генераторов на триодах ГУ-98АМ нет. Известны общие подходы, суть которых сводится к испытаниям на эквивалентную нагрузку (плазменную, активную и т.д.). Использование эквивалентов нагрузки для отладочных работ является стандартной процедурой. Такие работы проводились для макетирования систем ионно-циклотронного нагрева токамаков [6–10]. В каждом случае с учетом особенностей системы ионно-циклотронного нагрева выбиралась или изготавливалась соответствующая нагрузка. Последовательность макетирования обычно включает испытания генератора на холостом ходу, на эквивалент активной нагрузки и на эквивалент

плазменной нагрузки. Один из важных этапов в макетировании и наладке генератора это испытание на эквивалент активной нагрузки, поскольку оно позволяет проверить и подтвердить работоспособность системы с генерацией и передачей полезной мощности. Испытания на активную нагрузку обычно проводят не на полной мощности, а ограничиваются примерно 30% от неё. Конструкция такой нагрузки представляет собой устройство, присоединяемое к фидеру в качестве его продолжения. Это может быть сосуд объёмом в несколько литров, охлаждаемый водным раствором и монтируемый непосредственно на фидер. Поэтому целью настоящей работы является подготовка и испытание высокочастотного генератора системы ВЧ-нагрева плазмы токамака КТМ на активную нагрузку. Для достижения поставленной цели необходимо решить задачи по расчёту, разработке, изготовлению конструкции эквивалента активной нагрузки и испытанию на этот эквивалент генератора. В ходе испытаний необходимо определить возможность работы генератора на базовой или близкой к базовой частоте генерации, мощность, передаваемую в эквивалент нагрузки, а также коэффициент полезного действия (КПД) генератора нагруженного на эквивалент активной нагрузки.

РАСЧЁТ И РАЗРАБОТКА КОНСТРУКЦИИ ЭКВИВАЛЕНТА АКТИВНОЙ НАГРУЗКИ

Высокочастотная система токамака КТМ предназначена для дополнительного нагрева плазмы. ВЧ система токамака КТМ основана на применении автогенераторов с симметричным противофазным выводом и сложного распределенного колебательного контура, настроенного на рабочую частоту и состоящего из вносимого плазмой импеданса, контура модуля антенного, соединенного посредством двух четвертьволновых резонансных вакуумных фидеров последовательно с анодными контурами автогенератора [11]. Система ВЧ нагрева плазмы токамака КТМ содержит четыре одинаковых независимых устройства, каждое из которых включает ВЧ автогенератор мощностью 2 МВт, фидер и модуль антенный, с базовой частотой 13 МГц.

Модуль антенный ВЧ системы представляет собой симметричный колебательный контур, состоящий из излучающей петли и плоского вакуумного малоиндуктивного конденсатора. Противоположные концы петли возбуждаются противофазно. Контур антенного модуля настроен на рабочую частоту и имеет симметричный ввод. Также предусмотрена возможность изменения частоты с помощью подстроечных ёмкостей без нарушения вакуума на $\pm 0,5$ МГц. Антенные модули располагаются в радиальных патрубках вакуумной камеры токамака.

Модуль антенный имеет следующие технические характеристики:

- максимальное напряжение на каждом плече, кВ.....20÷25
- максимальная излучаемая мощность, МВт.... 2

- максимальная длительность ВЧ импульса, с. 5
- собственная частота, МГц 13,0±0,5
- расстояние от лимитера антенного модуля до границы плазмы, см 2,5
- индуктивность, нГн..... 356
- ёмкость, пФ..... 400 ÷456
- волновое сопротивление, Ом 27,9÷29,8

Фидер предназначен для транспортировки ВЧ мощности от ВЧ автогенератора к модулю антенному системы ВЧ нагрева плазмы токамака КТМ. В качестве фидера используется жесткая вакуумная коаксиальная передающая линия, подключенная последовательно к анодному контуру ВЧ автогенератора. Длина четвертьволнового коаксиальный фидера $l_f = 5769$ мм, волновое сопротивление фидера $\rho_f = 20,73$ Ом, внешний диаметр 178 мм и внутренний диаметр 126 мм. Наружная оболочка и внутренняя жила коаксиального фидера гальванически развязаны от вакуумной камеры токамака, поскольку токамак находится под плавающим напряжением около 1 кВ. При испытаниях автогенератора на эквивалент активной нагрузки эта гальваническая изоляция не требуется. Поэтому фидер собирается без нее так, чтобы его параметры удовлетворяли условиям работы автогенератора и передачи энергии в эквивалент нагрузки.

Рабочие параметры фидера рассчитаны из предположения, что ВЧ автогенератор нагружен на эквивалентное сопротивление нагрузки 2 Ом, при которой имеет место максимальная мощность генерации, сопротивление излучения модуля антенного в плазму 2 Ом, волновое сопротивления контура антенного модуля 29 Ом.

Расчёты, проведенные при разработке ВЧ автогенератора, показали, что для получения сопротивления нагрузки 2 Ом необходимое волновое сопротивление четвертьволнового фидера, для рабочих параметров антенного модуля, должно быть порядка 20 Ом.

Напряжение в четвертьволновом фидере, соединенном последовательно с анодным контуром автогенератора минимально на входе в фидер и максимально на входе в контур модуля антенного. Зная максимальное и минимальное напряжения, не учитывая потерь можно оценить передаваемую мощность по формуле:

$$P = \frac{U_{max} \cdot U_{min}}{2 \cdot Z_0},$$

где: P – передаваемая мощность, U_{min} – минимальное (на входе в фидер) напряжение, U_{max} – максимальное (на выходе из фидера) напряжение, Z_0 – волновое сопротивление фидера.

Технические характеристики фидера:

- рабочее давление, торр10⁻⁵
- волновое сопротивление, Ом..... 20
- рабочая частота, МГц..... 13±0,5
- геометрическая длина фидера от длины волны в нем 1/4

Высокочастотный автогенератор выполнен по двухтактной схеме, поэтому при расчёте эквивалента нагрузки, в силу симметричности рассматривается одно из плеч. Также, для возможной гибкости настроек генератора и по причине не идеальности и не возможности создания абсолютно активного эквивалента нагрузки в расчётах учитываются реактивные составляющие схемы. Тогда электрическая схема для расчёта эквивалента нагрузки будет иметь следующий вид (рисунок 1):

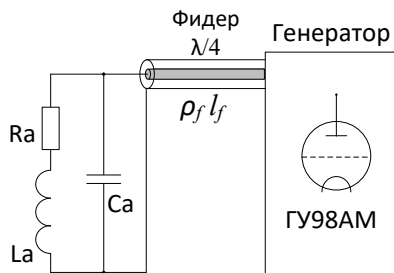


Рисунок 1. Электрическая схема для расчёта эквивалента нагрузки

Исходя из вышеизложенного, для дальнейших расчётов приняты следующие исходные данные:

- рабочая частота $f = 13 \cdot 10^6$ Гц;
- круговая частота $\omega = 2\pi f$;
- длина волны $\lambda = \frac{c}{f} = 23,077$ м;
- волновое число $\beta = 0,272$;
- волновое сопротивление контура антенного модуля $\rho_a = 29$ Ом;
- сопротивление излучения R_a на плечо принимается равным 1 Ом [11].

Индуктивность плеча антенного контура равна:

$$L_a = \frac{\rho_a}{2\omega} = 177,5 \cdot 10^{-9} \text{ Гн.}$$

Емкость плеча антенного контура равна:

$$C_a = \frac{2}{\omega \rho_a} = 844,3 \text{ пФ.}$$

Эквивалентное сопротивление плеча контура антенного модуля вычисляется по следующей формуле [12]:

$$Z_s = \frac{(R_a + j\omega L_a) \frac{1}{j\omega C_a}}{R_a - j\omega L_a - \frac{1}{\omega C_a}},$$

введя параметр $X_a = \omega L_a - \frac{1}{\omega C_a}$, получим:

$$Z_s = \frac{(R_a + j\omega L_a) \frac{1}{j\omega C_a}}{R_a - jX_a} = \frac{\left(\frac{L_a}{C_a} - j \frac{R_a}{\omega C_a}\right)(R_a - jX_a)}{R_a^2 - X_a^2} =$$

$$\frac{\frac{L_a R_a}{C_a} - \frac{R_a X_a}{\omega C_a} - j \left(\frac{L_a X_a}{C_a} + \frac{R_a^2}{\omega C_a} \right)}{R_a^2 - X_a^2}.$$

Поскольку $Z_s = R_s + jX_s$, соответственно, активная составляющая эквивалентного сопротивления:

$$R_s = \frac{\frac{L_a R_a}{C_a} - \frac{R_a X_a}{\omega C_a}}{R_a^2 - X_a^2},$$

реактивная:

$$X_s = \frac{-\frac{L_a X_a}{C_a} - \frac{R_a^2}{\omega C_a}}{R_a^2 - X_a^2}.$$

Резонансная частота параллельного контура с сопротивлением R_a и индуктивностью L_a в одном плече и с емкостью C_a в другом плече определяется согласно следующему выражению:

$$\omega = \frac{1}{\sqrt{L_a C_a}} \sqrt{1 - \left(\frac{R_a}{\rho_a}\right)^2} = \omega_0 \sqrt{1 - \left(\frac{R_a}{\rho_a}\right)^2},$$

где $\rho_a = \sqrt{\frac{L_a}{C_a}}$, $\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{L_a C_a}}$.

Подставляя исходные данные в уравнения, находим для $R_s = 210,25$ Ом, $X_s = 0$.

Исходя из этого, для проверки работоспособности ВЧ автогенератора системы дополнительного нагрева плазмы токамака КТМ, с учётом возможности перенастроек, решили использовать эквивалент активной нагрузки величиной $R = 210$ Ом в виде водного соляного раствора объемом $\sim 4,0$ дм³ между системой плоских электродов.

При выборе профиля изолятора нагрузки, исходя из условия идеальности согласования сопротивления раствора и волнового сопротивления лабораторного фидера $Z_0 = 21$ Ом ($Z_0 = 60 \cdot \ln(D_2/D_1) = 21$ Ом, где D_1, D_2 соответственно внутренний и внешний диаметр). При малой радиальной утечке заряда будем иметь равенства [13, 14]

$$\gamma_0 \cdot \int_0^l \frac{dz}{\pi \cdot r^2(z)} = \frac{60}{\sqrt{\epsilon}} \cdot \ln(D_2 / D_1(l)), \quad D_1(z) = 2 \cdot r(z),$$

где γ_0 – удельное сопротивление раствора, ϵ – диэлектрическая проницаемость материала изоляции, $r(z)$ – текущий радиус изолятора в зависимости от координаты z , отсчитываемой от плоскости наружного фланца. Отсюда для идеального согласования имеем форму профиля изолятора и требуемую сопротивленность раствора,

$$r(z) = (D_2 / 2) \cdot \sqrt{1 - (4 \cdot \gamma_0 \cdot \sqrt{\epsilon} \cdot z / 30 \cdot \pi \cdot D_2^2)}$$

при $r(l) = D_1/2$, $\gamma_0 \approx \left(\frac{30 \cdot \pi}{\sqrt{\epsilon}}\right) \cdot \frac{(D_2 - D_1) \cdot (D_2 + D_1)}{4 \cdot l}$,

где l – протяженность участка активной нагрузки. Таким образом, для идеального согласования на длине $l = 25$ см нагрузки $Z_0 = 21$ Ом потребуется соляной раствор с удельным сопротивлением $\gamma_0 \approx 100$ Ом·см. Для обеспечения же нагрузки порядка 210 Ом требуется раствор с удельным сопротивлением порядка 1 кОм·см. Обычно очищенная дистиллированная вода имеет удельное сопротивление на уровне 1 МОм·см. В качестве солей возможно использование поваренной соли (NaCl), медного купороса (CuSO₄), теосульфат натрия (фотозакрепитель). Для измерения общего сопротивления эквивалента нагрузки на постоянном токе необходимо предусмотреть в конструкции лабораторного фидера технологические лючки. Соблюдение нужного профиля сеченного изолятора можно произвести приближенно

$$R_n \approx (D_2 / 2) \cdot \sqrt{1 - \text{const} \cdot n \cdot \Delta Z}$$

с допустимой константой пересчета и фиксированной шириной каждой секции сборного изолятора ΔZ . Глубина проникновения поля в проводящую среду с удельным сопротивлением $\gamma_0 \approx 1$ кОм·см при частоте поля $f = (\omega/2\pi) = 13$ МГц составит порядка 0,4 м = $\Delta s = (2 \cdot \gamma_0 / (\mu_0 \cdot \omega))^{1/2}$, что значительно превышает габариты нагрузки.

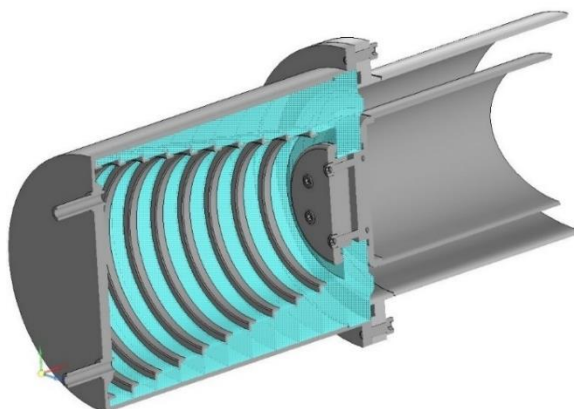


Рисунок 2. 3D модель эквивалента нагрузки, подключенного к выходу фидера (голубым цветом показан изолятор)

На рисунке 2 представлена 3D модель эквивалента нагрузки с выходом лабораторного фидера, который при рассеянии 150 кВт ВЧ мощности в течение 5 с, обеспечит требуемый режим работы четвертьволнового трансформатора (2 Ом → 210 Ом) с удержанием температуры раствора не более 50 градусов. Общее комплексное сопротивление эквивалента нагрузки будет ($\epsilon_w = 81$):

$$Z = R_0 / (1 + j \cdot \omega \cdot R_0 \cdot C_0) = \frac{R_0 \cdot (1 - j \cdot \omega \cdot \tau)}{(1 + \omega^2 \cdot \tau^2)},$$

$$\tau = \gamma_0 \cdot \epsilon_0 \cdot \epsilon_w = R_0 \cdot C_0,$$

где R_0 – измеренное сопротивление на постоянном токе солевого раствора, C_0 – емкость конструкции на рабочей частоте заполненная очищенной водой.

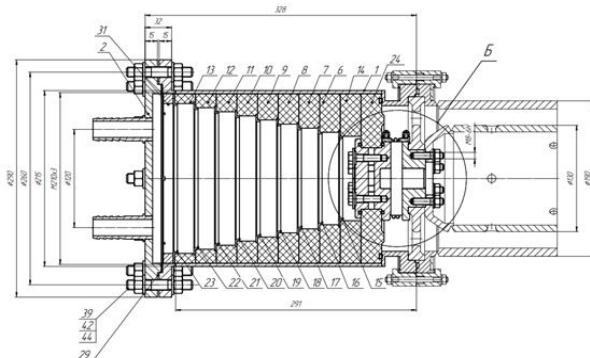
Легко оценить, что при удельном сопротивлении 1 кОм·см постоянная релаксации раствора τ составит порядка 4 нс, в то время как период поля при 13 МГц составляет $T = 1/f = 77$ нс. Таким образом, следует ожидать полный импеданс $Z \approx 200 \cdot (1 - j \cdot 0,3)$ Ом.

Изменяя концентрацию соляного раствора можно менять сопротивление эквивалента нагрузки при проведении испытаний ВЧ автогенератора.

В ходе настройки ВЧ-автогенератора, при необходимости, потребуется компенсировать емкостную составляющую сопротивления эквивалента нагрузки в том числе экспериментально подбирая концентрацию раствора.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИСПЫТАНИЯ ВЧ-ГЕНЕРАТОРА СИСТЕМЫ ИЦР НАГРЕВА ПЛАЗМЫ ТОКАМАКА КТМ НА ЭКВИВАЛЕНТ АКТИВНОЙ НАГРУЗКИ

Для испытаний ВЧ-генератора разработан и изготовлен эквивалент нагрузки (рисунок 3), в виде цилиндра объёмом около 4,0 литров, заполняемого водным солевым раствором. Для обеспечения надёжной работы генератора сопротивление эквивалента, включая ёмкостную составляющую, подбирали путём регулирования концентрации соляного раствора.



а) чертеж эквивалента активной нагрузки



б) изготовленный эквивалент активной нагрузки

Рисунок 3. Эквивалент активной нагрузки

Испытания проводились на одном плече генератора с лампой VL2, в то время как плечо с лампой VL1 отключалось. Настройка электрических цепей и

**ИСПЫТАНИЕ ВЧ-ГЕНЕРАТОРА СИСТЕМЫ ИЦР НАГРЕВА ПЛАЗМЫ ТОКАМАКА КТМ
НА ЭКВИВАЛЕНТ АКТИВНОЙ НАГРУЗКИ**

режимов работы осуществлялась на частоте, близкой к рабочей (~12–14 МГц).

Для реализации испытаний ВЧ-генератора на эквиваленте активной нагрузки (ЭАН) были внесены следующие изменения в схему, представленные на рисунке 4:

- общая шина, на которой собраны конденсаторы C18, C19, C20 и C21, соединяется с корпусом генератора вспомогательной шиной с минимальной индуктивностью;
- конденсаторы C18, C19 демонтируются;
- индуктивность L6 присоединяется к корпусу;
- индуктивность L7 соединяется с внутренним токопроводом фидера № 2;
- индуктивность L3 отсоединяется от бачка лампы.

Испытания ВЧ-генератора на эквивалент активной нагрузки проводили по структурной схеме, представленной на рисунке 5.

Управление генератором и контроль параметров осуществлялись с помощью штатного пульта управления ВЧ-генератором и дополнительной системы регистрации. Оборудование располагалось в отдельном помещении лабораторного корпуса КТМ. При помощи дополнительной системы на ЭВМ регистрировались следующие параметры:

- анодное напряжение;
- напряжение и ток накала;
- ток анода и сетки;
- частота генерации;
- температура нагрева солевого раствора внутри эквивалента активной нагрузки.

Перед испытаниями устанавливалась минимальная обратная связь:

- ползунок переменной индуктивности (сеточной) L9 выставлен в начальное положение слева от максимального значения;
- значения ёмкости сеточной и анодной цепи установлены на минимальные значения;
- в сеточном контуре использован гридлик с активным сопротивлением 62 Ом;
- ёмкость анодного контура (C20+C21) – $238 \cdot 10^{-9}$ Ф;
- ёмкость сеточного контура (C22+C23) – $503 \cdot 10^{-9}$ Ф;
- давление внутри фидера, заполненного азотом – $0,2 \cdot 10^5$ Па;
- внутренний объём ЭАН заполнен водным солевым раствором с сопротивлением ~210 Ом;
- контроль температуры осуществлялся термометром сопротивления (ТСП), начальная температура раствора – 18–19 °С.

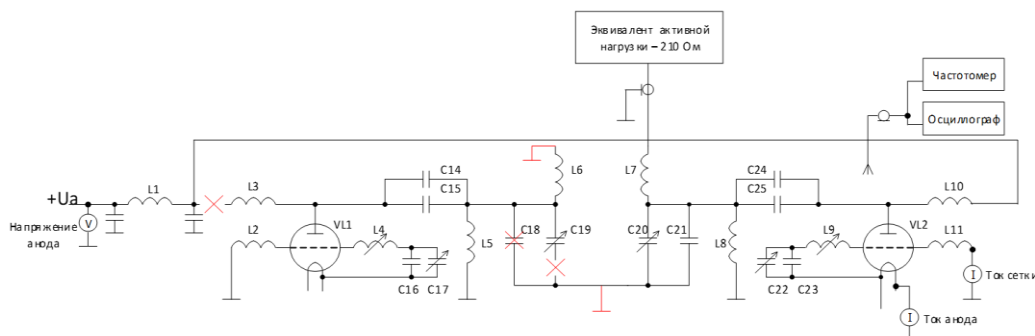


Рисунок 4. Принципиальная электрическая схема проведения испытания второго плеча ВЧ-генератора на эквивалент активной нагрузки

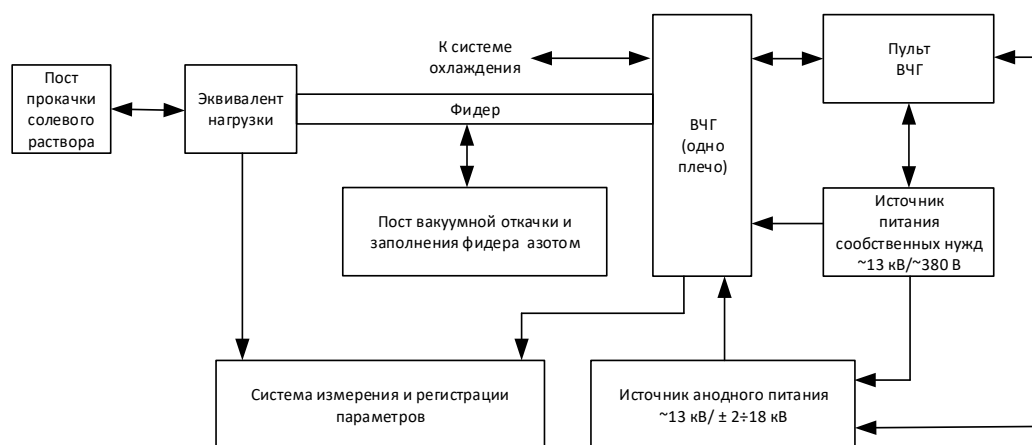


Рисунок 5. Структурная схема испытания ВЧ-генератора на эквивалент активной нагрузки

Испытания проводились с длительностью включения ВЧ-генератора 1–2 секунды. Осуществлялись тесты без циркуляции и с циркуляцией раствора в ЭАН. Контур бака с солевым раствором на время экспериментов развязывался посредством перекрытия диэлектрического вентиля циркуляции солевого раствора.

На всех этапах испытаний анодное напряжение (U_a) с пульта управления ВЧ-генератора не превышало 6 кВ. Частота генерации измерялась частотомером VC3165.

Мощность в эквиваленте активной нагрузки определялась по сигналам с ёмкостных датчиков ВЧ-напряжения, установленных в начале и конце фидера, по следующей формуле:

$$P_{\text{ЭАН}} = \frac{K_{\text{д1}} \cdot K_{\text{д2}} \cdot U_{\text{д1}} \cdot U_{\text{д2}}}{2 \cdot Z_{\text{вф}}},$$

где: $K_{\text{д1}}$ – коэффициент деления (675) первого датчика ВЧ-напряжения; $K_{\text{д2}}$ – коэффициент деления (996,5) второго датчика ВЧ-напряжения; $U_{\text{д1}}$ – напряжение первого датчика (начало фидера); $U_{\text{д2}}$ – напряжение второго датчика (конец фидера); $Z_{\text{вф}}$ – волновое сопротивление фидера (20,73 Ом).

Сигналы с датчиков ВЧ-напряжения регистрировались осциллографом.

КПД ВЧ-генератора определялся по формуле:

$$\eta = \frac{P_{\text{ЭАН}}}{E_a \cdot I_a},$$

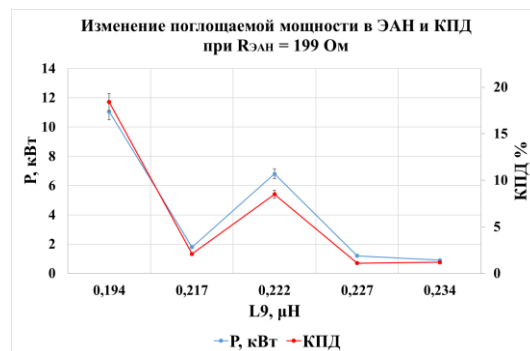
где E_a – анодное напряжение; I_a – анодный ток.

В ходе проведения испытаний, на начальном этапе, определены электрические цепи генератора, изменение параметров в которых оказывает наибольшее влияние на режимы работы в целом. Как и предполагалось изначально, это цепи сеточного контура, а именно индуктивность L_9 . В дальнейшем, перестройкой номинала этой индуктивности проводились основные изменения в работе генератора. Сопротивление эквивалента нагрузки также изменялось и контролировалось для условий устойчивой генерации на частоте близкой к базовой и достижения наибольшего КПД. Величина индуктивности L_9 менялась перемещением ползунка-перемычки от 60 мм до 130 мм. В таблице 1 показано соответствие положения ползунка-перемычки и величины индуктивности.

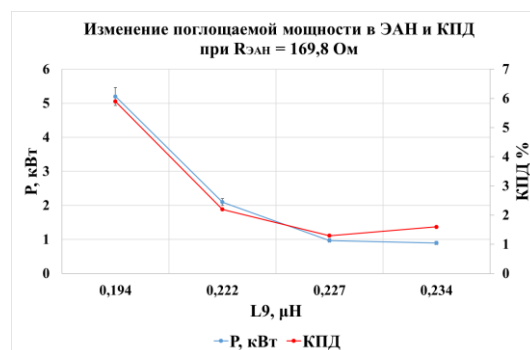
Таблица 1. Соответствие положения ползунка-перемычки от начальной точки регулятора величине индуктивности

	Положение ползунка-перемычки						
	60	70	80	90	100	110	130
Начальная точка регулятора мм	60	70	80	90	100	110	130
Индуктивность, мкГн	0,24	0,234	0,227	0,222	0,217	0,21	0,194

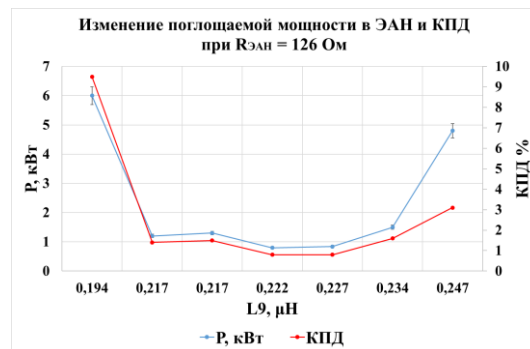
На рисунке 6 показаны зависимость поглощаемой мощности в ЭАН и КПД от индуктивности L_9 при различных сопротивлениях ЭАН.



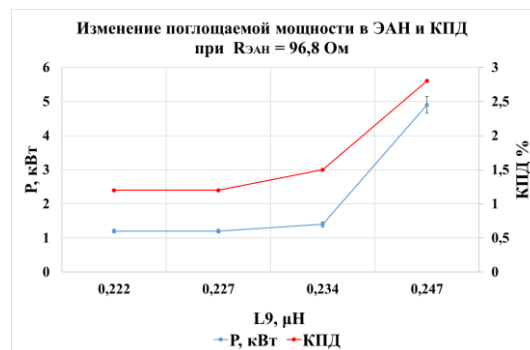
а) изменение поглощаемой мощности в ЭАН и КПД при $L_9 = 70 \div 130$ мм, $R = 199$ Ом



б) изменение поглощаемой мощности в ЭАН и КПД при $L_9 = 70 \div 130$ мм, $R = 169,8$ Ом



в) изменение поглощаемой мощности в ЭАН и КПД при $L_9 = 60 \div 130$ мм, $R = 126$ Ом



г) изменение поглощаемой мощности в ЭАН и КПД при $L_9 = 60 \div 90$ мм, $R = 96,8$ Ом

Рисунок 6. Зависимость поглощаемой мощности и КПД от индуктивности L_9 при различных сопротивлениях ЭАН

Из представленных результатов видно, что при значении индуктивности L_9 в 0,194 мкГн достигаются максимальные значения как мощности (более 11 кВт), так и КПД (до 19%). Это указывает на резонансный и согласованный режим работы генератора и нагрузки, при котором энергия эффективно передаётся. При дальнейшем увеличении индуктивности происходит резкий спад, а затем на 0,222 мкГн наблюдается вторичный максимум, что может быть связано с дополнительными резонансными эффектами. Поведение системы при этом сопротивлении демонстрирует высокую чувствительность к точной настройке L_9 .

Во втором случае с меньшим сопротивлением и более высокой температурой максимум мощности и КПД также приходится на 0,194 мкГн, но его значение значительно ниже (до 5,5 кВт и 6% соответственно). При увеличении индуктивности наблюдается снижение мощности и КПД. Это может свидетельствовать о затухании резонансных явлений или их менее выраженном проявлении на фоне изменений температуры и импеданса.

Третий график демонстрирует двойной резонансный пик: на 0,194 мкГн и 0,247 мкГн зафиксированы наибольшие значения мощности (до 6,5 кВт) и КПД (до 10%). В центральной части диапазона индуктивностей наблюдается минимум, что говорит о существенном влиянии настройки L_9 . Это может быть результатом резонансных провалов или несогласования фазовых условий такой конфигурации.

При самом низком сопротивлении ЭАН и высокой температуре эффективность ВЧ-нагрева находится на минимуме: мощность не превышает 2,5–3,5 кВт, а КПД – 2,5%. Резонансный пик не наблюдается, кривая мощности растёт с увеличением L_9 , но без чётко выраженного максимума. Это говорит о потере резонансной настройки генератора и нагрузки и значительном ухудшении эффективности системы в условиях низкого сопротивления и сильного нагрева.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рассчитана конструкция, разработан чертёж и изготовлен эквивалент активной нагрузки. Проведены испытания ВЧ-генератора системы дополнительного нагрева плазмы токамака КТМ на этот эквивалент. В ходе испытаний определена возможность работы генератора на базовой или близкой к базовой частоте генерации, мощность, передаваемая в эквивалент нагрузки, коэффициент полезного действия (КПД) генератора, нагруженного на эквивалент активной нагрузки. Подготовлен и испытан высокочастотный генератор системы ВЧ-нагрева плазмы токамака КТМ на активную нагрузку.

В результате экспериментов:

- определены коэффициент полезного действия (КПД) системы;
- выявлена оптимальная рабочая частота для эффективной передачи мощности;

– успешно протестирован ВЧ-генератор с ЭАН, подтверждена его работоспособность и оптимальные параметры электрических цепей.

Анализ экспериментальных данных позволил опделить параметры, при которых система достигает максимальной эффективности передачи ВЧ-мощности.

Проведённые исследования дают возможность более точно оценить рабочие характеристики оборудования и внести необходимые корректировки до ввода системы в полномасштабную эксплуатацию на плазменную нагрузку.

Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке научно-технической программы «Научно-техническое обеспечение экспериментальных исследований на казахстанском материаловедческом токамаке КТМ» ИРН № BR23891779 Министерства энергетики Республики Казахстан, а также при поддержке гранта Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (Договор №112 от 24 июня 2024 года).

ЛИТЕРАТУРА / REFERENCES

1. B. Chektybayev, I. Tazhibayeva, E. Batyrbekov, E. Kashykbayev, D. Olkhovik, D. Zarva, S. Zhunisbek, A. Duisen, A. Zhaksybayeva, A. Lee, V. Pavlov, V. Dokuka, R. Khayrutdinov Improvement of plasma discharge performance at KTM tokamak // Fusion Engineering and Design. – 2024. – Vol. 208. – Art. no.114684.
2. B. Chektybayev, S. Zhunisbek, I. Tazhibayeva, D. Olkhovik, E. Batyrbekov, D. Zarva, A. Korovikov, A. Lee, V. Pavlov, E. Kashykbayev, A. Zhaksybayeva, A. Duisen Overview of the first experiments at KTM tokamak to obtain plasma discharges // Fusion Engineering and Design. – 2023. – Vol. 194. – Art. no. 113847. ISSN 0920-3796, <https://doi.org/10.1016/j.fusengdes.2023.113847>
3. B. Chektybayev, A. Sadykov, E. Batyrbekov, A. Lee, V. Pavlov Study of breakdown and plasma formation in the KTM tokamak with the massive conductive vacuum chamber // Fusion Engineering and Design. – 2021. – Vol. 163. – Art. no. 112167.
4. A.V. Gulkin et al. Optimization and preparation for the start-up of the plasma ICR heating system at the KTM tokamak // Fusion Engineering and Design Vol.206, (2024), 114596. <https://doi.org/10.1016/j.fusengdes.2024.114596>
5. А. Н. Сатибеков и др. // Вестник. Серия физическая. – 2022. – Том 82. – № 3. [А. Н. Satibekov i dr. // Vestnik. Seriya fizicheskaya. – 2022. – Vol. 82. – No. 3. (In Russ.)]
6. M. J. Mantsinen et. al. // Nucl. Fusion, 2023. – Vol. 63. – P. 43–54. <https://doi.org/10.1088/1741-4326/aceb08>
7. E. Lerche et al. // Nucl. Fusion, 2016. – Vol. 56. – P. 134–141. <http://doi.org/10.1088/0029-5515/56/3/036022>
8. A. Messiaen et al. // Fusion Engineering and Design. – 2005. – Vol. 74. – P. 367–375. <https://doi.org/10.1016/j.fusengdes.2005.06.201>
9. QIN Chengming et. Al. // Plasma Science and Technology, 2015. – Vol. 17. – No. 2. – P. 1088–1100.

10. Gian Luca Ravera et. al. // Proceedings of the 42nd European Microwave Conference, 2012. – Vol. 3. – No. 1. – P. 18–27.
11. 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. [Azizov E.A., Gostev A.A., Brykov S.I., Gur'evich 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. VCh sistema dopolnitel'nogo nagreva plazmy tokamaka KTM // Induktsionnyy nagrev. –2011. – No. 1(15). – P. 28–31. (In Russ.)]
12. Атабеков Г.И., Основы теории цепей / Учебник для вузов. – М.: «Энергия», 1969, 424 стр. [Atabekov G.I., Osnovy teorii tsepey / Uchebnik dlya vuzov. – Moscow: “Energiya”, 1969, 424 p.]
13. Ye. O. Kazakov, I. V. Pavlenko, D. VanEester, B. Weysow, I. O. Girka // Plasma Phys. Control. Fusion. – 2010. – Vol. 52. – Art. no. 115006. <https://doi.org/10.1088/0741-3335/52/11/115006>
14. Сазонов Д.М., Гридин А.Н., Мишустин Б.А., Устройства СВЧ, М.: «Высшая школа», 1981, 295 стр. [Sazonov D.M., Gridin A.N., Mishustin B.A., Ustroystva SVCh, Moscow: “Vysshaya shkola”, 1981, 295 p. (In Russ.)]

КТМ ТОКАМАГЫНЫҢ ПЛАЗМАСЫН ИЦР ҚЫЗДЫРУ ЖҮЙЕСІНІҢ ЖЖ-ГЕНЕРАТОРЫН БЕЛСЕНДІ БАЛАМА ЖҮКТЕМЕСІ БОЙЫНША СЫНАУ

**А. В. Гулькин^{1*}, Қ. Жеңіс², Б. Ж. Чектыбаев², А. Т. Қусайнов², В. И. Савкин², С. В. Котов²,
Д.Б. Зарва¹, С.А. Мукенева¹, Е.А. Кашикбаев², Д. А. Ольховик², А. М. Губин³, Д. В. Гетман³**

¹ «Қазақстан Республикасының Ұлттық ядролық орталығы» РМК, Курчатова, Қазақстан

² ҚР ҰЯО РМК «Атом энергиясы институты» филиалы, Курчатова, Қазақстан

³ Д. В. Ефремов атындағы электрфизикалық аппаратура бойынша ғылыми-зерттеу институты,
Санкт-Петербург, Ресей

* Байланыс үшін E-mail: gulkin@nnc.kz

Токамактардың көбінде плазманың қажетті параметрлерін алу үшін температура, ұстау уақыты және т. б. сияқты қосымша қыздыру немесе қосымша қуат енгізу қолданылады. Бұл өзекті ғылыми міндеттерді шешуге және заманауи зерттеулер жүргізуге мүмкіндік береді. Жоба бойынша КТМ токамагында иондық-циклотрондық қыздыру көмегімен плазмаға қосымша қуат енгізу көзделген. КТМ плазмасын қосымша қыздыру жүйесі әрқайсысы 2 МВт болатын жоғары жиілікті бірдей төрт генератордан тұрады. КТМ токамагында қосымша қуатты енгізу және плазманы қыздырудың басқа жүйелері қарастырылмаған. Мұндай жүйелерді қолданар алдында штаттық режимде балама жүктемені қосу арқылы жөндеу жұмыстары мен сынақтар жүргізіледі. Мақалада белсенді балама жүктеменің есептемесі берілген. Есептеу нәтижесінде 300 кВт жоғары жиілікті қуатты сініру қамтамасыз етілетін пішін мен геометриялық өлшемдер анықталды. КТМ токамагының плазмасын қосымша ЖЖ қыздыру жүйесі үшін балама жүктеменің габариттері мен конструкциясының негізгі параметрлері анықталды. Есептеу тұзды су ерітіндісінен жасалған сініргіші бар резонатор түріндегі балама жүктемені жасау аса қолайлы болады деген болжаммен жүргізілді. Сондай-ақ әзірленген белсенді балама жүктемені пайдалана отырып жөндеу жұмыстарының эксперименттік нәтижесі ұсынылды. Әзірленген балама жүктемемен КТМ токамагында қуатты генераторды қажетті сынақтан өткізіп, ойдағыдай теңшеуге болатыны, қосымша қуатты енгізу жүйесін одан әрі баптау жұмыстарына және плазмалық жүктемеге қосуға дайындауға болатыны көрсетілді.

Түйін сөздер: токамак, КТМ, иондық-циклотрондық қыздыру, антенналық модуль, жүктемесінің баламасы.

**TESTING OF THE HF GENERATOR OF THE ICR PLASMA HEATING SYSTEM
OF THE KTM TOKAMAK FOR AN EQUIVALENT ACTIVE LOAD**

**A. V. Gulkin¹, K. Zhenis², B. Zh. Chektybaeyev², A. T. Kussainov², V. I. Savkin², S. V. Kotov²,
D. B. Zarva¹, S. A. Mukeneva¹, E.A.Kashikbayev², D. A. Olkhovik², A. M. Gubin³, D. V. Getman³**

¹ RSE “National Nuclear Center of the Republic of Kazakhstan”, Kurchatov, Kazakhstan

² Branch “Institute of Atomic Energy” RSE NNC RK, Kurchatov, Kazakhstan

³ JSC “NIIEFA”, Saint Petersburg, Russia

* E-mail for contacts: gulkin@nnc.kz

In most tokamaks, additional heating or extra power input is used to achieve the necessary plasma parameters such as temperature, confinement time, etc. This makes it possible to address current scientific challenges and conduct advanced research. The KTM tokamak will implement additional power input into the plasma using ion-cyclotron heating, as specified in the design. The additional plasma heating system on the KTM consists of four identical high-frequency generators, each with a capacity of 2 MW. No other systems for additional power input and plasma heating are provided on the KTM tokamak. Before operating such systems in normal mode, debugging and testing are conducted using load equivalents. This article presents the calculation of an active load equivalent. Based on the calculation results, the shape and geometric dimensions that ensure the absorption of up to 300 kW of high-frequency power are determined. The dimensions and main parameters of the load equivalent design for the additional high-frequency plasma heating system of the KTM tokamak have been determined. The calculations were carried out based on the assumption that the most preferable option is to create the load equivalent in the form of a resonator with an absorber made of saline aqueous solution. Experimental results from debugging using the developed active load equivalent are also presented. It has been demonstrated that with the developed load equivalent, it is possible to successfully carry out the necessary tests and adjustments of a high-power generator, and to prepare the additional power input system on the KTM tokamak for further debugging and switching to operation under plasma load.

Keywords: tokamak, KTM, ion-cyclotron heating, antenna module, load equivalent.