

УДК 533.9

Р.Г. Левин (5 курс, каф. ФП), Н.В. Сахаров, к. ф.-м. н.

МАГНИТНЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ В ТОКАМАКЕ С МАЛЫМ АСПЕКТНЫМ ОТНОШЕНИЕМ ГЛОБУС-М

Основная проблема, с которой сталкиваются при обработке экспериментальных результатов, заключается в нехватке методик определения плазменных параметров по измеренным величинам в приближении малого аспектного отношения. В связи с этим возникает потребность в разработке новых методик расчета плазменных параметров на основе численного моделирования, в частности с помощью расчета равновесия плазмы в токамаке.

Глобус-М представляет собой установку типа сферический токамак - установку с малым аспектным отношением (большой радиус плазмы $R=0.36$ м, малый радиус $a=0.24$ м, аспектное отношение 1.5). На данный момент эта установка является единственной в России установкой такого типа. Установка типа сферический токамак имеет ряд преимуществ по сравнению с установками с большим аспектным отношением.

Электромагнитная система токамака Глобус-М спроектирована по классической схеме, когда все обмотки расположены вне вакуумной камеры. Основными задачами электромагнитной системы токамака Глобус-М являются: генерация тороидального и полоидального магнитных полей; генерация тока по плазме; управление равновесием плазмы; создания конфигураций магнитных полей, благоприятных для пробоя; создание конфигурации магнитного поля с X-точкой.

Магнитная система полоидального поля состоит из девяти пар обмоток. Данные обмотки разбиты на три функциональные группы – обмотки компенсации рассеянного поля соленоида (СС), “медленные” (PF) и “быстрые” (VFC, HFC) обмотки управления положением и формой плазменного шнура. Магнитная система тороидального поля состоит из 16 одновитковых D-образных катушек, соединенных последовательно. Центральный соленоид установки Глобус-М выполнен в виде двухслойной катушки, общая высота составляет 1.3 м.

Вакуумная камера объемом 1.1 м^3 представляет собой цельносварную конструкцию из нержавеющей стали, оборудованную патрубками для диагностики ввода дополнительного нагрева плазмы. Конструкция сварена из внутреннего цилиндра толщиной 2 мм, двух полусфер толщиной 3 мм и толстого наружного кольца толщиной 14 мм.

Система магнитной диагностики токамака состоит из магнитных петель для измерения интегрального ток плазмы, тока по вакуумной камере, внешнего и внутреннего напряжения на обходе тора, вертикального и горизонтального магнитного потока, тороидального магнитного плазменного потока; поясов Роговского для измерения для измерения токов в обмотках системы питания и двух типов магнитных зондов – градиентные зонды для измерения градиента магнитного потока и зонды определения формы магнитной поверхности и сигнала МГД неустойчивостей.

Для исследования методики определения радиального положения плазмы и полоидального β , а также реконструкция магнитных поверхностей, использовалась программа расчета равновесных магнитных конфигураций.

Программа разработана и выполнена на языке программирования Си для IBM/PC в Научно Исследовательском Институте Электрофизической Аппаратуры им. Д.В.

Ефремова. В процессе работы проведена дополнительная адаптация программы для условий экспериментов. Учтены, в частности токи, протекающие по вакуумной камере.

Для аксиально-симметричной геометрии ищется равновесие плазмы, удовлетворяющее внутри заданной области плазмы уравнению Грэда-Шафранова

$$\Delta^* \Psi \equiv R \frac{\partial}{\partial R} \left(\frac{1}{R} \frac{\partial \Psi}{\partial R} \right) + \frac{\partial^2 \Psi}{\partial Z^2} = -2\pi \mu_0 R \cdot j_\phi, \quad (1)$$

где μ_0 – магнитный поток, j_ϕ – плотность плазменного тока.

В программе предусмотрена возможность вывода на экран следующей информации:

1. запас устойчивости плазмы $q(\psi) = \frac{R \cdot B_t}{2\pi} \cdot \oint_\psi \frac{dl}{R^2 \cdot B_p}$ (интеграл берется по

текущей магнитной поверхности);

2. значения произведения радиуса на тороидальное поле $R \cdot B_t$ в точках внутри плазмы и значение тороидального плазменного магнитного потока.

3. внутренняя индуктивность плазмы $I_i = \frac{2 \cdot V}{R_{axis}} \cdot \frac{\langle B_p \rangle^2}{(\mu_0 I_p)^2}$ здесь R_{axis} – радиус

магнитной оси плазмы, $\langle \rangle$ соответствует усреднению по объему плазмы. Размерная величина индуктивности плазмы. $L_i = \mu_0 R_{axis} I_i / 2$.

4. параметры, характеризующие крайнюю магнитную поверхность: a , R , A , k , δ , q , где a – малый радиус плазмы, A – аспектное отношение, R – большой радиус плазмы, k – вытянутость сечения плазмы, δ – треугольность плазмы, q – значение запаса устойчивости на крайней магнитной поверхности.

На основе данных расчетов были получены следующие эмпирические зависимости плазменных параметров от измеренных величин:

Зависимость радиального смещения плазменного шнура от магнитных полей на границе плазмы и магнитного потока:

$$\Delta = \frac{\Delta \Psi}{\frac{\partial \Psi_2}{\partial R} - \frac{\partial \Psi_1}{\partial R}} \cdot \begin{cases} A_1, & A_1 \cdot \frac{\Delta \Psi}{\frac{\partial \Psi_2}{\partial R} - \frac{\partial \Psi_1}{\partial R}} < \Delta_0 \\ A_2, & A_1 \cdot \frac{\Delta \Psi}{\frac{\partial \Psi_2}{\partial R} - \frac{\partial \Psi_1}{\partial R}} > \Delta_0 \end{cases} + \Delta_0 \quad (1)$$

Зависимость радиального смещения плазменного шнура от интегрального тока по плазме и магнитного потока:

$$\Delta = \frac{\Delta \Psi}{I_p} \cdot \begin{cases} A_1, & A_1 \cdot \frac{\Delta \Psi}{I_p} < \Delta_0 \\ A_2, & A_1 \cdot \frac{\Delta \Psi}{I_p} > \Delta_0 \end{cases} + \Delta_0 \quad (2)$$

A – численные коэффициенты, полученные эмпирическим путем.

Зависимость тороидального плазменного потока от полоидального β :

$$\delta \Psi [\text{mV} \cdot \text{s}] = 1.377 \cdot \frac{I_p^2 [\text{MA}]}{B_\tau(R_0) [\text{TI}]} (1 - \beta_p) \cdot R [\text{cm}] \quad (3)$$

Также, в будущем планируется использование алгоритма подвижных токовых колец для реконструкции внешней магнитной поверхности по измерениям полоидального магнитного поля вокруг плазмы. Этот алгоритм базируется на аппроксимации плазменного шнура конечным числом (3-5) токовых колец, для которых рассчитывается значение тока, протекающего в них, радиус и вертикальное положение.

Формулы (1)-(3) используются в реальных расчетах, а также, зависимость (1) будет использована для управления положением плазменного шнура по горизонтали. Данные

методики могут быть использованы и на других токамаках с малым аспектным отношением. Расчетные магнитные поверхности сопоставлены с соответствующими плазменными фотографиями, что показало хорошую точность реконструкции магнитных поверхностей.