

УДК 533.9

СИСТЕМА МАГНИТНОГО УПРАВЛЕНИЯ ПЛАЗМОЙ РЕАЛЬНОГО ВРЕМЕНИ С АЛГОРИТМОМ ВОССТАНОВЛЕНИЯ РАВНОВЕСИЯ В ОБРАТНОЙ СВЯЗИ ДЛЯ ТОКАМАКА ГЛОБУС-М2

© 2023 г. А. Е. Коньков^{a,*}, П. С. Коренев^{a,**}, Ю. В. Митришкин^{a,b},
И. М. Балаченков^c, Е. О. Киселев^c

^aИнститут проблем управления им. В.А. Трапезникова Российской академии наук, Москва, Россия

^bМосковский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия

^cФизико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук, Санкт-Петербург, Россия

*e-mail: konkov@physics.msu.ru

**e-mail: pkorenev@ipu.ru

Поступила в редакцию 19.06.2023 г.

После доработки 28.07.2023 г.

Принята к публикации 28.07.2023 г.

Для управления формой плазмы во время разряда в токамаке необходимо рассчитывать форму плазмы в реальном времени. Требования к скорости расчета формы особенно высоки для токамаков с небольшим радиусом, таких как Глобус-М2 (Санкт-Петербург, Россия). Представлена система магнитного управления плазмой реального времени для токамака Глобус-М2 с алгоритмом восстановления равновесия плазмы FCDI в обратной связи. Система управления содержит дискретные одномерные и матричные ПИД-регуляторы, синтезированные методом матричных неравенств на LPV-модели плазмы, рассчитанной на экспериментальных данных, и осуществляет согласованное управление положением и формой плазмы, а также компенсацией рассеянного поля центрального соленоида. Алгоритм FCDI (Flux and Current Distribution Identification) был улучшен для работы в режиме реального времени, и позволяет восстанавливать форму плазмы за 20 мкс. Моделирование цифровой системы управления с алгоритмом в обратной связи было проведено на стенде реального времени, состоящего из двух целевых машин реального времени (ЦВРМ) Speedgoat Performance, и продемонстрировало среднее значение ТЕТ (Task Execution Time, время расчета за такт) в 67 мкс.

DOI: 10.31857/S0367292123600760, EDN: APGEWX

1. ВВЕДЕНИЕ

Для достижения желаемых конфигураций плазмы в современных токамаках необходимы системы управления положением, током и формой плазмы, также называемые системами магнитного управления плазмой. Форма плазмы не может быть измерена непосредственно и должна быть рассчитана по сигналам магнитной диагностики токамака в режиме реального времени. Эта задача называется задачей восстановления равновесия плазмы (plasma equilibrium reconstruction problem). Ранние алгоритмы восстановления равновесия имели время расчета за такт (ТЕТ) в 30 мс на токамаке DIII-D на пространственной сетке 33×33 [1]. Для современных алгоритмов типично ТЕТ в диапазоне от 200 до 400 мкс, например, 200 мкс на токамаке TCV с сеткой 28×65 [2] и 375 мкс на токамаке EAST с сеткой 129×129 [3]. Требования малости ТЕТ для расчета формы особенно сильны для небольших токамаков, таких как Глобус-М2 [4], с короткой длительностью

разряда около 100 мс от пробоя до вывода плазменного тока.

В этой статье описывается улучшенный алгоритм восстановления равновесия FCDI (Flux and Current Distributions Identification) [5] для работы в реальном времени на токамаке Глобус-М2 с ТЕТ в 20 мкс, и система магнитного управления плазмой с алгоритмом FCDI в обратной связи. Система управления и алгоритм FCDI разработаны в среде Matlab/Simulink, с использованием Matlab Embedded Coder для генерации C++ кода, который компилируется в приложение реального времени для ЦВРМ Speedgoat Performance, которая может использоваться в обратной связи реальной системы управления плазмой как устройство HIL (Hardware-in-the-loop).

Система управления, представленная в этой статье, была улучшена по сравнению с [6–8], и является первой системой реального времени магнитного управления плазмой для токамака Глобус-М2 с алгоритмом восстановления в об-

ратной связи. Эта система управления реализует согласованное управление положением и формой плазмы с автоматическим расчетом задающих воздействий на положение плазмы и обеспечивает компенсацию рассеянного поля центрального соленоида.

Объект управления описан в разд. 2. Разделы 3–5 описывают задачу восстановления равновесия и алгоритм FCDI. В разд. 6 показана модель объекта управления, а в разделе 7 – структура системы управления. Результаты моделирования в реальном времени показаны в разд. 8. Выводы сформулированы в разд. 9.

2. ОБЪЕКТ УПРАВЛЕНИЯ

Алгоритм восстановления равновесия плазмы и система управления, описываемые в данной статье, разработаны для использования на токамаке Глобус-М2 (ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург, Россия) [4]. Система обмоток полоидального поля токамака Глобус-М2 изображена на рис. 1 и состоит из 6 ОПП (обмоток полоидального поля): 4-секционная обмотка ОГУП (обмотка горизонтального управляющего поля), используемая для управления вертикальным положением плазмы, 2-секционная ОВУП (обмотка вертикального управляющего поля), используемая для управления горизонтальным положением плазмы, ОИ (обмотка индуктора), используемая для генерации тока плазмы, 6-секционная ОК (обмотка коррекции), компенсирующая рассеянное полоидальное поле соленоида, и 2-секционные ОУ1 и ОУ3, которые предполагается использовать для управления формой плазмы. Секции обмоток соединены последовательно согласно, за исключением ОГУП, верхние и нижние секции которой соединены последовательно встречно. Магнитная диагностика токамака Глобус-М2 включает пояса Роговского, измеряющие токи в шести ОПП (I_{PF}) и ток плазмы (I_p), а также 21 магнитную петлю, измеряющие магнитный полоидальный поток (Ψ_{ML}) вблизи камеры токамака. На данный момент в токамаке Глобус-М2 применяется аналоговая система управления положением и током плазмы и токами в обмотках, относящаяся к типу RZIP систем управления (система управления положением и током плазмы) [9].

3. ВОССТАНОВЛЕНИЕ РАВНОВЕСИЯ ПЛАЗМЫ

Токамак – аксиально-симметричная установка, поэтому равновесие плазмы в токамаке принято описывать на полоидальной плоскости (r, z) . Для этого вводится функция распределения полоидального потока $\psi(r, z)$ [10]. Она определяется

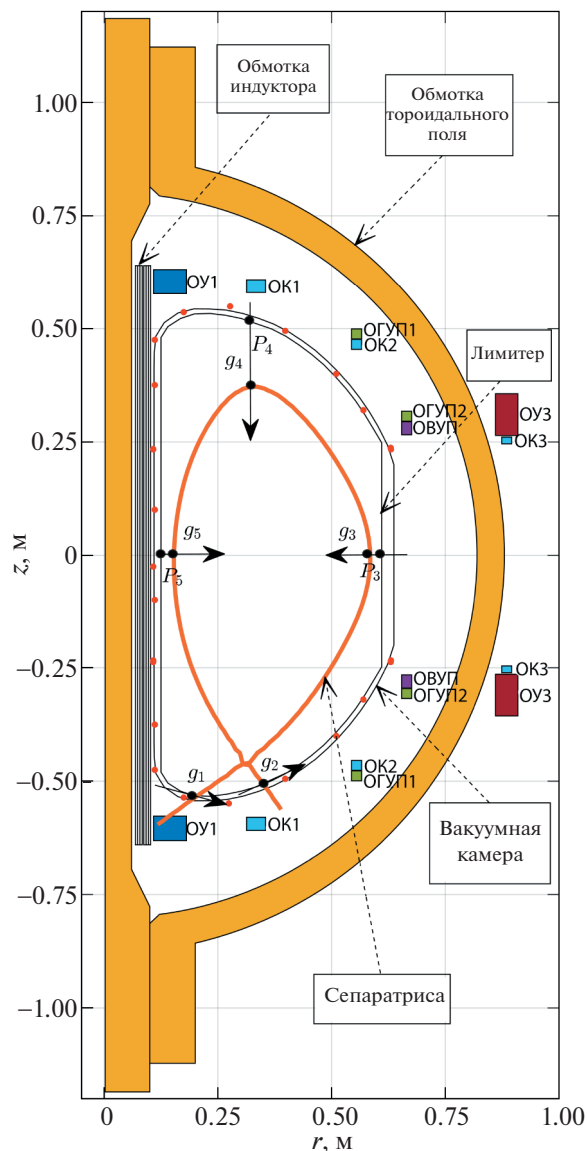


Рис. 1. Полоидальное сечение токамака Глобус-М2 с восстановленной алгоритмом FCDI-FF сепаратрисой плазмы, положениями ударных точек g_{1-2} и зазорами между сепаратрисой и лимитером g_{3-5} . Красные точки – положения магнитных петель.

как магнитный поток через поверхность S , ограниченную окружностью с координатами (r, z) :

$$\psi(r, z) = \frac{1}{2\pi} \iint_S \mathbf{B} d\mathbf{S} = \int_0^r r' B_z(r', z) dr'.$$

Граница плазмы может быть найдена как наибольшая замкнутая линия уровня распределения полоидального потока. Таким образом, задача идентификации формы плазмы сводится к идентификации распределения полоидального потока.

Распределение полоидального потока ψ и плотность тороидального тока J в токамаке связаны дифференциальным уравнением равновесия

$$r \frac{\partial}{\partial r} \frac{1}{r} \frac{\partial \psi}{\partial r} + \frac{\partial^2 \psi}{\partial z^2} = -\mu_0 r J, \quad (1)$$

$$\psi|_{r=0} = 0, \quad \psi|_{r=\infty} = 0.$$

Плотность тока является источником в уравнении и однозначно определяет полоидальный поток, если она известна. Решение уравнения может быть найдено с использованием метода функции Грина [9]

$$\psi(r, z) = \iint G(r, z, r', z') J(r', z') dS,$$

$$G(r, z, r', z') = \frac{\mu_0}{\pi} \sqrt{\frac{rr'}{k}} \left[\left(1 - \frac{k}{2}\right) K(k) - E(k) \right], \quad (2)$$

$$k = \frac{4rr'}{(r+r')^2 + (z-z')^2},$$

где K и E — эллиптические интегралы первого и второго рода соответственно.

Таким образом, для нахождения полоидального потока следует в первую очередь найти распределение плотности тока в токамаке. Плотность тока в токамаке имеет три компонента: плотность тока в обмотках J_c , плотность тока плазмы J_p и плотность тока в вакуумной камере J_v .

Магнитная диагностика токамака Глобус-М2 включает пояса Роговского, измеряющие токи I_c в 6 ОПП, площади поперечного сечения обмоток известны, распределение тока по сечению катушки может считаться равномерным для задачи восстановления равновесия, и следовательно, плотность тока в обмотках известна: $J_c = I_c/S_c$, $c = 1, \dots, 6$.

Также в токамаке Глобус-М2 с помощью пояса Роговского измеряется ток плазмы $I_p = \iint J_p dS$, однако площадь плазмы не фиксирована, и распределение плотности тока плазмы неравномерно, поэтому необходимы дополнительные приближения с учетом измеренного значения тока плазмы.

Также, магнитная диагностика токамака Глобус-М2 включает 21 магнитную петлю, которые измеряют значения полоидального потока вне плазмы, накладывая дополнительные ограничения на распределение полоидального потока.

Для оценки того, насколько хорошо идентифицированные распределения ψ и $J = J_c + J_v + J_p$

соответствуют измерениям, мы вводим квадратичный функционал ошибки

$$\chi^2 = \sum_k \left(\frac{\psi(r_k, z_k) - \Psi_{MLk}}{\sigma_k} \right)^2 + \left\| \frac{J_v - \tilde{J}_v}{\sigma_v} \right\|^2 + \left(\frac{\iint J_p dS - I_p}{\sigma_p} \right)^2. \quad (3)$$

Здесь Ψ_{MLk} — это полоидальный поток, измеренный k -й магнитной петлей, \tilde{J}_v — это оценка плотности тока в камере токамака, получение которой описывается в следующем разделе, а I_p — это ток плазмы, измеренный поясом Роговского. Таким образом, задача восстановления равновесия заключается в нахождении распределений ψ и $J = J_c + J_v + J_p$, которые минимизируют функционал (3) и удовлетворяют уравнению (1).

4. МОДЕЛИРОВАНИЕ ТОКОВ В КАМЕРЕ ТОКАМАКА

Токи в вакуумной камере (ВК) в токамаке Глобус-М2 не измеряются, однако плотность тока в ВК может быть оценена по закону Фарадея. Вакуумная камера является большой конструкцией с неравномерным распределением тока, поэтому для ее представления используются 56 элементов, каждый с собственным током $I_v = S_v J_v$, $v = 1, \dots, 56$, где поперечные сечения S_v элементов известны. Токи ВК возбуждаются в соответствии с дифференциальным уравнением

$$M_{vv} \frac{dI_v}{dt} + M_{vc} \frac{dI_c}{dt} + M_{vp} \frac{dI_p}{dt} + R_v I_v = 0. \quad (4)$$

Здесь R_v — диагональная матрица сопротивлений элементов ВК, M_{vv} — матрица индуктивности для элементов ВК, M_{vc} и M_{vp} — матрицы взаимной индуктивности между элементами ВК и обмотками токамака и плазмой соответственно. Сопротивления и индуктивности ВК известны, как и взаимные индуктивности между ВК и обмотками, но из-за непостоянных формы и положения плазмы ее индуктивность не фиксирована и известна лишь приблизительно, данная неопределенность учитывается путем присвоения соответствующей погрешности рассчитываемым токам I_v .

Токи в 56 элементах ВК образуют 56-мерное пространство токов камеры. Чтобы уменьшить количество расчетов требуемых для моделирования токов камеры, в алгоритме FCDI используется разложение токов ВК на индуктивно несвязанные токовые моды. Переход к базису токовых мод должен совершаться при помощи матрицы перехода $P = \|p_{ij}\|$, $I_v = P \tilde{I}_v$, где \tilde{I}_v — токи камеры

в пространстве токовых мод. Для получения матрицы перехода рассмотрим выражение тока в k -м элементе камеры через токовые моды

$$I_v^{(k)} = \sum_j p_{kj} \tilde{I}_v^{(j)}. \quad (5)$$

Поскольку искомые токовые моды индуктивно не связаны, при отсутствии внешних наводок токовые моды должны затухать экспоненциально $\tilde{I}_v^{(j)} \propto e^{-t/\tau_j}$, где τ_j – характерное время затухания j -й токовой моды, следовательно производная тока в k -м элементе камеры равна

$$\frac{d}{dt} I_v^{(k)} = \sum_j p_{kj} \frac{d}{dt} \tilde{I}_v^{(j)} = -\sum_j \frac{p_{kj}}{\tau_j} \tilde{I}_v^{(j)}. \quad (6)$$

При отсутствии внешних наводок магнитный поток Ψ_k через k -й элемент ВК выражается через элементы матрицы индуктивности $M_{vv} = \|M_{vv}^{(ij)}\|$

$$\Psi_k = \sum_m M_{vv}^{(km)} I_v^m, \quad (7)$$

при этом его производная согласно (4) равна

$$\frac{d}{dt} \Psi_k = -R_v^{(k)} I_v^k, \quad (8)$$

где $R_v^{(k)}$ – сопротивление k -го элемента камеры.

Беря производную от (7) и подставляя выражения (5), (6) и (8), получаем

$$\sum_m \sum_j \frac{M_{vv}^{(km)} p_{mj}}{\tau_j} \tilde{I}_v^{(j)} = \sum_j R_v^{(k)} p_{kj} \tilde{I}_v^{(j)}.$$

Поскольку данное равенство должно выполняться при любых значениях $\tilde{I}_v^{(j)}$, коэффициенты перед $\tilde{I}_v^{(j)}$ в правой и левой части должны быть равны. Приравняв их, получим систему алгебраических уравнений для нахождения элементов матрицы перехода P и характерных времен затухания τ_j

$$\sum_m \frac{M_{vv}^{(km)}}{R_v^{(k)}} p_{mj} = \tau_j p_{kj}, \quad k, j = 1, \dots, 56. \quad (9)$$

Несложно заметить, что данная система ставит задачу нахождения собственных векторов и значений матрицы $Q = \|q_{km} = M_{vv}^{(km)} / R_v^{(k)}\|$, при этом столбцы матрицы P находятся как собственные векторы матрицы Q , а времена затухания мод τ_j как собственные значения матрицы Q .

В отличие от известных методов моделирования камеры [11, 12], использование полученного представления токов ВК через токовые моды позволяет уменьшить размерность задачи, и вместо расчета токов в 56 элементах ВК, рассчитывать только величины токовых мод с наибольши-

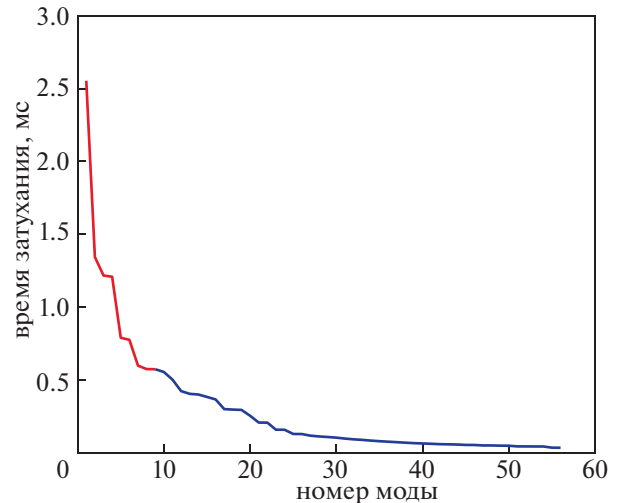


Рис. 2. Характерные времена затухания токовых мод камеры Глобус-М2. Используемые при моделировании моды выделены красным.

ми временами затухания, показанными на рис. 2. В частности, равновесия плазмы токамака Глобус-М2, полученные с учетом 9 токовых мод с наибольшими временами затухания практически не отличаются от равновесий полученных с учетом большего числа мод, и вместо решения системы 56 дифференциальных уравнений (4) для 56 элементов ВК, достаточно решать аналогичную систему из 9-ти уравнений для 9 токовых мод ВК:

$$\tilde{M}_{vv} \frac{d\tilde{I}_v}{dt} + \tilde{M}_{vc} \frac{dI_c}{dt} + \tilde{M}_{vp} \frac{dI_p}{dt} + \tilde{R}_v \tilde{I}_v = 0. \quad (10)$$

Используемые в этих уравнениях коэффициенты взаимной индуктивности между токовыми модами и обмотками токамака находятся как величины магнитного потока, создаваемые токовыми модами с единичным током. Так, согласно (5) при единичном токе в j -й моде ток в k -м элементе ВК равен p_{kj} и взаимная индуктивность между обмотками токамака и j -й токовой модой равна

$$\tilde{M}_{vc}^{(k)} = \sum_k M_{vc}^{(k)} I_v^{(k)} = \sum_k M_{vc}^{(k)} p_{kj},$$

где $M_{vc}^{(k)}$ – k -я строка матрицы M_{vc} из (4). Аналогично считаются индуктивности между токовыми модами камеры и плазмой. Используя выражения для магнитного потока через проводники с распределенным током, получим матрицу взаимной индуктивности между токовыми модами. Взаимная индуктивность между k -й и j -й токовой модой равна

$$\tilde{M}_{vv}^{(kj)} = \sum_m \sum_n M_{vv}^{(mn)} p_{mk} p_{nj},$$

подставляя (9), получим

$$\tilde{M}_{vv}^{(kj)} = \tau_j \sum_m R_v^{(m)} p_{mj} p_{mk}, \quad (11)$$

но поскольку матрица индуктивности симметрична $M_{vv}^{(mn)} = M_{vv}^{(nm)}$, можно также записать

$$\tilde{M}_{vv}^{(kj)} = \sum_m \sum_n M_{vv}^{(nm)} p_{mk} p_{nj} = \tau_k \sum_n R_v^{(n)} p_{nk} p_{nj}. \quad (12)$$

В случае $k \neq j$, в общем случае $\tau_j \neq \tau_k$, и из (11) и (12) следует $\tilde{M}_{vv}^{(kj)} = 0$, т.е. полученные моды действительно индуктивно не связаны. В случае $j = k$ мы получаем выражение для собственной индуктивности k -й моды

$$\tilde{M}_{vv}^{(kk)} = \tau_k \sum_n R_v^{(n)} p_{nk}^2. \quad (13)$$

При этом эффективное сопротивление k -й моды равно

$$\tilde{R}_v^{(k)} = \tilde{M}_{vv}^{(kk)} / \tau_k = \sum_n R_v^{(n)} p_{nk}^2. \quad (14)$$

5. АЛГОРИТМ FCDI-FF

Плотность тока в обмотках J_c известна из измерений, а токи в ВК могут быть оценены согласно (10). Поэтому основной задачей восстановления равновесия плазмы является определение плотности тока плазмы J_p . Чтобы удовлетворять требованиям к скорости работы алгоритма для токамака Глобус-М2, был разработан режим FF (Fixed Filaments) алгоритма FCDI [5], реализующий метод токовых колец (филаментов) [13, 14] для восстановления равновесия плазмы. В этом методе плазма аппроксимируется рядом токовых колец с заданными пользователем положениями, распределение плазменного тока и порождаемого им полоидального потока при этом выглядят следующим образом:

$$J_p = \sum_f I_f \delta(r - r_f, z - z_f),$$

$$\Psi_p(r, z) = \sum_f I_f G(r, z, r_f, z_f).$$

Токи в филаментах определяются минимизацией функционала ошибки (3).

Так как восстановление равновесия это обратная задача, она поставлена некорректно по Адамару, и минимизация функционала (3) требует регуляризации для фильтрации физически нереалистичных решений с большой нормой. Для этой цели алгоритм FCDI использует метод SVDT (SVD Truncation) [15]. В этом методе квадратичный функционал (3) записывается в матричной форме $\|Ax - b\|^2$, где x – это вектор свободных параметров (токи ВК и филаментов). Решения с

большими токами фильтруются при отбрасывании вкладов малых сингулярных значений матрицы A в решение.

Результаты работы алгоритма включают координаты 24 точек на границе плазмы (с шагом 15° вдоль окружности), расстояния между этими точками и лимитером (первой стенкой ВК) токамака, вытянутость и треугольность плазмы, а также положения двух ударных точек g_{1-2} (точек пересечения лимитера и ограничивающей плазму линии уровня потока, называемой сепаратрисой, см. рис. 1).

Поскольку точки на сетке и положения филаментов известны до начала восстановления, значения функции Грина вычисляются заранее, а полоидальный поток может быть получен как линейная комбинация предварительно вычисленных значений, что уменьшает число вычислений, требуемых в процессе восстановления. Кроме того, не требуется регулярность или прямоугольность вычислительной сетки, что позволяет сократить ее только до точек, необходимых для вычисления положения сепаратрисы плазмы.

Алгоритм FCDI-FF был внедрен на ЦВРМ Speedgoat Performance с процессором Intel i7-7700K, работающим на частоте 4.2 ГГц. Результаты моделирования в реальном времени показали ТЕТ в 20 мкс при использовании сетки из 1000 точек и 14-ю филаментами, что достаточно быстро для управления формой плазмы в токамаке Глобус-М2.

6. ДИСКРЕТНАЯ LPV-МОДЕЛЬ ПЛАЗМЫ

Восстановленные распределения плотности тока плазмы J_p использовались для расчета массива линейных моделей $\{A, B, C\}_k$, описывающих динамику плазмы в разряде. Здесь индекс k обозначает момент времени $t_k = T_s k$, для которого получается модель [16]. Массив линейных моделей образует LPV-модель (Linear Parameter Varying)

$$\begin{cases} x(T_s k + T_s) = A(T_s k)x(T_s k) + B(T_s k)u(T_s k), \\ y(T_s k) = C(T_s k)x(T_s k), \end{cases} \quad (15)$$

$$A(T_s k) = A_k, \quad B(T_s k) = B_k, \quad C(T_s k) = C_k.$$

Вектор входов u состоит из отклонений напряжений на обмотках $u = \delta U_{PF}$. Вектор выходов y включает в себя вертикальное и горизонтальное смещения плазмы, тока плазмы, отклонения токов в шести обмотках и значений полоидального магнитного потока на 21-й магнитной петле, $y = [\delta Z \delta R \delta I_P \delta I_{PF}^T \delta \Psi_{ML}^T]^T$, $\sigma I_{PF} = [\delta I_{HFC} \delta I_{VFC} \delta I_{CS} \delta I_{CC} \delta I_{PF1} \delta I_{PF2}]^T$. Состояние системы описывается

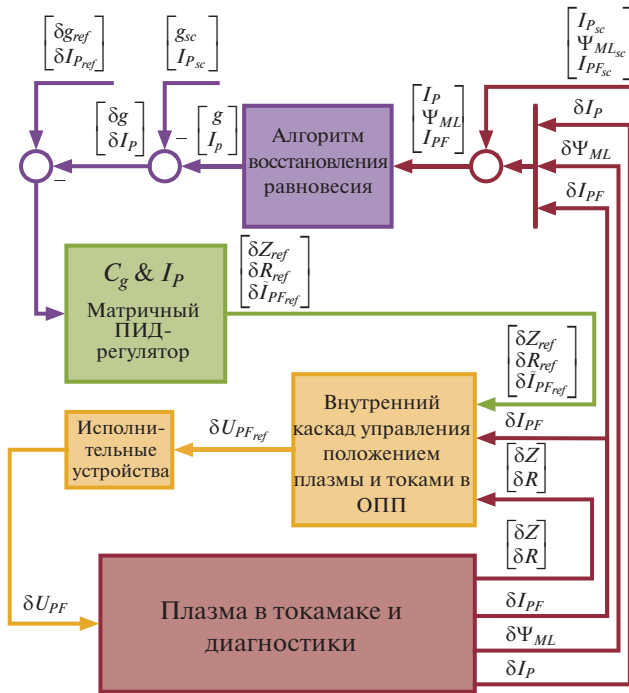


Рис. 3. Блок-схема системы управления положением, током и формой плазмы.

вектором x . Шаг дискретизации модели $T_s = 100$ мкс. Всего LPV-модель имеет 30 выходов, 6 входов и 24 состояния.

7. СТРУКТУРА СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ

На рис. 3 показана блок-схема иерархической каскадной системы магнитного управления плазмой в токамаке Глобус-М2. Внешний каскад управления содержит многомерный матричный ПИД-регулятор $C_{g \& I_p}$ для управления током и формой плазмы. Выходами этого каскада являются задающие воздействия на вертикальное δZ_{ref} и горизонтальное δR_{ref} положения плазмы, что обеспечивает согласованное управление положением и формой плазмы. Также на выходе этого каскада находится вектор задающих воздействий на отклонения токов в обмотках $\delta \tilde{I}_{PF_{ref}} = [\delta I_{CS_{ref}} \ \delta I_{PF_{1ref}} \ \delta I_{PF_{3ref}}]^T$. Вектор $[I_{P_{sc}} \ I_{PF_{sc}}^T \ \Psi_{ML_{sc}}^T]^T$ содержит сценарные значения тока плазмы, токов в 6 обмотках и потоков на 21 магнитной петле. g_{sc} – сценарные значения двух точек ударных точек и 3 зазоров между плазмой и лимитером (см. рис. 1), выбранные для управления из 24 зазоров, рассчитываемых алгоритмом FCDI-FF. Внутренний каскад управления содержит два одномерных ПИД-регулятора C_Z и C_R для управления положением плазмы и один многомерный матричный

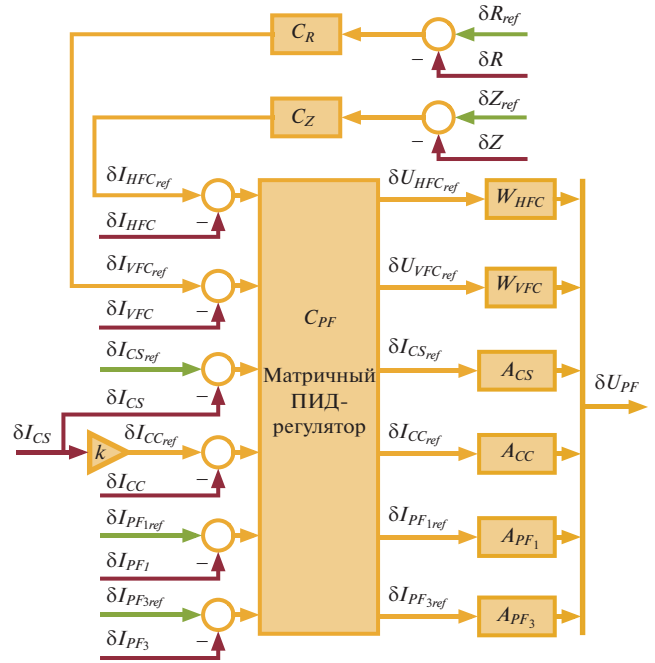


Рис. 4. Блок-схема внутреннего каскада управления положением плазмы и токами в обмотках полоидального поля с источниками питания.

ПИД-регулятор C_{PF} для управления токами в обмотках.

На рис. 4 показана блок-схема внутреннего каскада управления с источниками питания обмоток. Обмотка коррекции (ОК) должна компенсировать рассеянное полоидальное поле, создаваемое обмоткой индуктора (ОИ). Синтезированная система управления обеспечивает пропорциональность токов в ОИ и ОК, т.е. $I_{CC} \approx k I_{CS}$, где коэффициент k зависит от сценария. Исполнительными устройствами являются источники питания обмоток. Блоки W_{HFC} и W_{VFC} на рис. 4 обозначают линейные модели автоколебательных инверторов тока, а блоки A_{CS} , A_{CC} , A_{PF_1} и A_{PF_3} обозначают линейные модели тиристорных выпрямителей.

Все ПИД-регуляторы в системе управления были синтезированы методом линейных матричных неравенств с использованием подхода [17]. Эффективность таких регуляторов в непрерывном времени уже была продемонстрирована для иерархической системы управления положением, током и формой плазмы в токамаке Глобус-М2 [8] и для каскадной системы управления положением плазмы в токамаке IGNITOR [18]. Этот метод был модифицирован для выполнения синтеза в дискретном времени, который ранее ис-

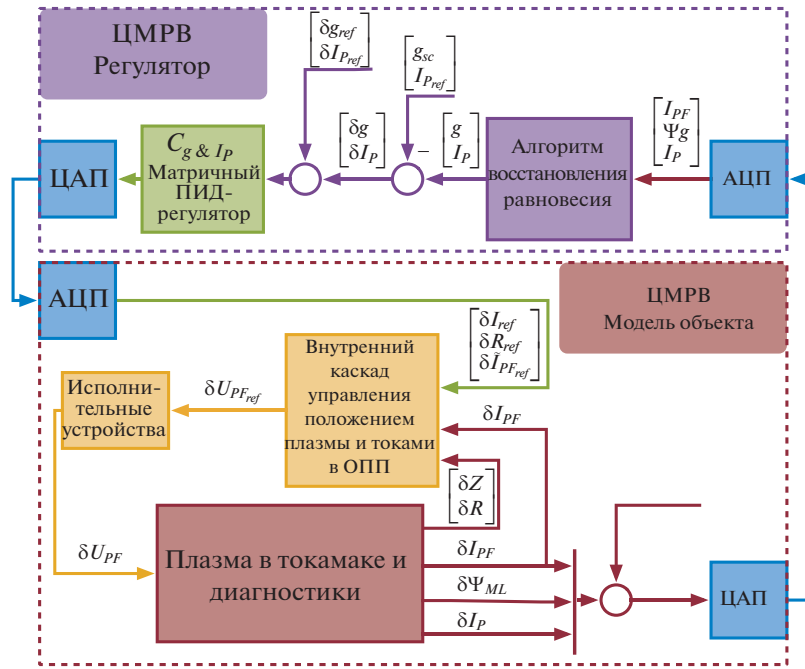


Рис. 5. Блок-схема моделирования системы управления в реальном времени.

пользовался для системы управления положением плазмы в токамаке Т-15МД [19]. Метод используется для синтеза многомерных матричных ПИД-регуляторов с m входами и q выходами, имеющих дискретную передаточную функцию

$$C(z) = K_p + K_I \frac{z T_s}{z - 1} + K_D \frac{z - 1}{z T_s},$$

где коэффициенты $\{K_p, K_I, K_D\} \in \mathbb{R}^{m \times q}$ являются недиагональными (произвольными) матрицами, а z – переменная Z -преобразования.

Этот метод не требует предварительной развязки каналов управления, обеспечивает настройку системы управления в определенной частотной области и позволяет задавать ограничения на \mathcal{H}_∞ -нормы различных Передаточных функций замкнутой системы. Сначала синтезируется регулятор $C_{PF}(z) \in \mathbb{C}^{6 \times 6}$, затем регуляторы $C_Z(z) \in \mathbb{C}^{1 \times 1}$ и $C_R(z) \in \mathbb{C}^{1 \times 1}$, и наконец регулятор $C_{g \& I_P}(z) \in \mathbb{C}^{6 \times 5}$. Каждый регулятор синтезируется на LPV-модели плазмы (15). В результате получается один набор регуляторов, который обеспечивает достаточный запас устойчивости и требуемое качество управления для каждой модели из массива $\{A, B, C\}_k$.

8. РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ В РЕАЛЬНОМ ВРЕМЕНИ

Моделирование проводилось на стенде реального времени [20] состоящим из двух ЦМРВ

Speedgoat Performance, соединенных в обратную связь “Модель объекта \rightleftharpoons Регулятор” через АЦП и ЦАП. На рис. 5 показана блок-схема при моделировании системы управления в реальном времени.

Согласно данной концепции, внутри блока ЦМРВ “Регулятор” находится внешний каскад управления током и формой плазмы с алгоритмом восстановления. Это позволяет использовать новую цифровую систему управления током и формой плазмы в экспериментах, где ЦМРВ “Модель объекта” заменяется реальным токамаком вместе с существующей аналоговой системой управления положением и током плазмы.

Другая концепция предлагает размещение обоих каскадов управления в блоке ЦМРВ “Регулятор”, при этом существующая аналоговая система управления положением и током плазмы заменяется новой цифровой системой управления.

На рис. 6 показаны результаты моделирования в реальном времени, где система управления смещает ударные точки g_{1-2} и зазоры g_{3-5} из одного положения в другое во время диверторной фазы плазменного разряда #37326. Система управления обеспечивает слежение за задающими воздействиями $g_{1-6 \text{ ref}}$ и удовлетворительное качество управления.

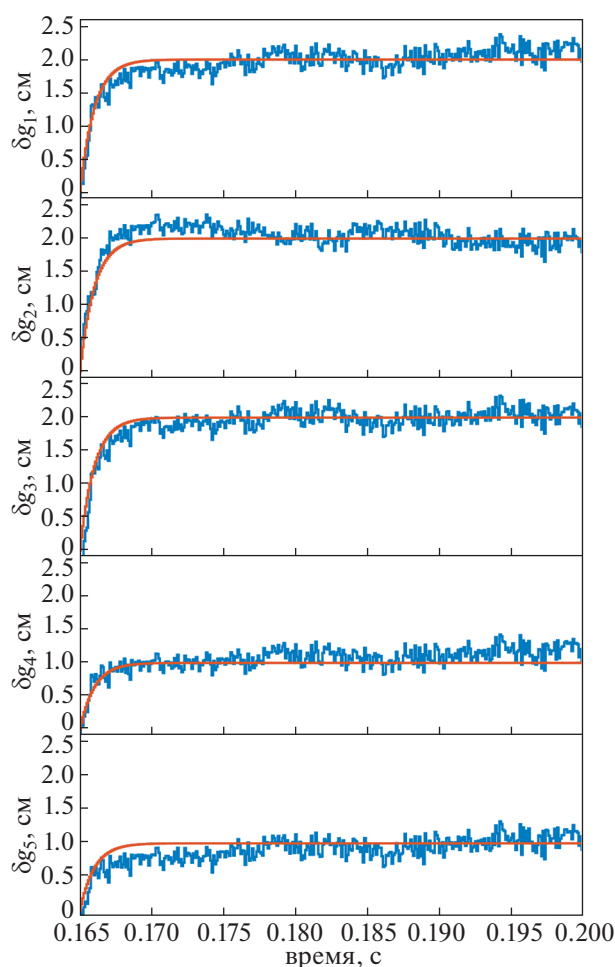


Рис. 6. Результаты моделирования в реальном времени, когда система управления смещает ударные точки g_{1-2} и зазоры g_{3-5} во время диверторной фазы плазменного разряда #37326. Красные линии – задающие воздействия.

9. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Моделирование в реальном времени подтвердило работоспособность разработанной системы магнитного управления плазмой, поэтому она готова к использованию в реальном эксперименте. Максимальное ТЕТ составляет 78 мкс, а среднее ТЕТ 56 мкс. Период дискретизации $T_s = 100$ мкс. Примерно 20 мкс тратится на работу алгоритма восстановления равновесия, около 5 мкс – на регуляторы, а оставшиеся 42 мкс уходят на преобразование сигналов в АЦП и ЦАП. Система управления удовлетворяет условию работы в реальном времени $TET \leq T_s$.

Для использования такой системы управления в реальном эксперименте необходимо выполнить следующую процедуру:

- рассчитать сценарий и провести плазменный разряд,
- восстановить равновесие плазмы и рассчитать дискретную LPV-модель плазмы,
- синтезировать систему управления на этой модели и выполнить моделирование в реальном времени, чтобы убедиться в ее работоспособности и качестве управления,
- применить разработанную систему магнитного управления плазмой с алгоритмом восстановления равновесия в эксперименте.

В настоящее время на токамаке Глобус-М2 отсутствует система управления формой плазмы с обратной связью. Внедрение предлагаемой системы магнитного управления плазмой с алгоритмом восстановления равновесия плазмы в обратной связи в практику экспериментов на токамаке Глобус-М2 позволит рассчитывать положение ударных точек и величины зазоров между сепаратрисой и лимитером токамака в реальном времени, что в свою очередь позволит осуществлять управление формой плазмы в течение плазменного разряда с заданным качеством управления.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 21-79-20180). Экспериментальная часть была выполнена на УНУ “Сферический токамак Глобус-М”, входящей в состав ФЦКП “Материаловедение и диагностика в передовых технологиях” ФТИ им. А.Ф. Иоффе.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ferron J., Walker M., Lao L., John H.S., Humphreys D., Leuer J. // Nuclear Fusion. 1998. Т. 38. С. 1055. <https://doi.org/10.1088/0029-5515/38/7/308>
2. Moret J.-M., Duval B., Le H., Coda S., Felici F., Reimerdes H. // Fusion Engineering and Design. 2015. Т. 91. С. 1. <https://doi.org/10.1016/j.fusengdes.2014.09.019>
3. Huang Y., Xiao B., Luo Z., Yuan Q. // Fusion Engineering and Design. 2018. Т. 128. С. 82. <https://doi.org/10.1016/j.fusengdes.2018.01.043>
4. Minaev V.B., Gusev V.K., Sakharov N.V., Varfolomeev V.I. // Nuclear Fusion. 2017. Т. 57. С. 066047. <https://doi.org/10.1088/1741-4326/aa69e0>
5. Корнев П.С., Коньков А.Е., Митришкин Ю.В., Балаченков И.М., Киселев Е.О., Минаев В.Б., Сахаров Н.В., Петров Ю.В. // Письма ЖТФ. 2023. Т. 49. С. 36. <https://doi.org/10.21883/PJTF.2023.07.54920.19468>
6. Mitrishkin Y.V., Korenev P.S., Kartsev N.M., Kuznetsov E.A., Prokhorov A.A., Patrov M.I. // Control Engineering Practice. 2019. Т. 87. С. 97. <https://doi.org/10.1016/j.conengprac.2019.03.018>
7. Mitrishkin Y.V., Prokhorov A.A., Korenev P.S., Patrov M.I. // Control Engineering Practice. 2020. Т. 100. С. 104446. <https://doi.org/10.1016/j.conengprac.2020.104446>

8. *Konkov A.E., Mitrishkin Y.V., Korenev P.S., Patrov M.I.* // IFAC PapersOnLine. 2020. Т. 53. С. 7344. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2020.12.1000>
9. *Ariola M., Pironti A.* Magnetic Control of Tokamak Plasmas. Springer International Publishing, 2016. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-29890-0>
10. *Wesson J., Campbell D.* Tokamaks. Clarendon Press, 2004. (International series of monographs on physics).
11. *Хайрутдинов Р.Р., Лукаш В.Э., Пустовитов В.Д.* // Физика плазмы. 2021. Т. 47. С. 1007. <https://doi.org/10.31857/s0367292121120039>
12. *Пустовитов В.Д.* // Физика плазмы. 2019. Т. 45. С. 1088. <https://doi.org/10.1134/s0367292119120072>
13. *Swain D., Neilson G.* // Nuclear Fusion. 1982. Т. 22. С. 1015. <https://doi.org/10.1088/0029-5515/22/8/002>
14. *Kuznetsov Y., Nascimento I., Galvao R., Yasin I.* // Nuclear Fusion. 1998. Т. 38. С. 1829. <https://doi.org/10.1088/0029-5515/38/12/308>
15. *Forsythe G., Malcolm M.M.C.* Computer methods for mathematical computations. USA, NJ: Englewood Cliffs, 1977.
16. *Mitrishkin Y.V., Korenev P.S., Konkov A.E., Krzhkov V.I., Ovsianikov N.E.* // Mathematics. 2021. Т. 10. С. 40. <https://doi.org/10.3390/math10010040>
17. *Boyd S., Hast M., Åström K.J.* // Intern. J. Robust Non-linear Control. 2016. Т. 26. Т. 1718. <https://doi.org/10.1002/rnc.3376.11>
18. *Mitrishkin Y., Korenev P., Konkov A., Kartsev N., Smirnov I.* // Fusion Engineering and Design. 2022. Т. 174. С. 112993. <https://doi.org/10.1016/j.fusengdes.2021.112993>
19. *Konkov A.E., Mitrishkin Y.V.* // IFAC-PapersOnLine. 2022. Т. 55. С. 327. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2022.07.057>
20. *Митришкин Ю., Коньков А., Корнев П.* // Устойчивость и колебания нелинейных систем управления (конференция Пятницкого): Материалы XVI Международной конференции. 2022. С. 286.