УДК 681.51:621.3.002.5:621.039.6:533.95

ИССЛЕДОВАНИЕ ПОЛОИДАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ ТОКАМАКА ГЛОБУС-М И УПРАВЛЕНИЕ ПОЛОЖЕНИЕМ ПЛАЗМЫ

В.Н. Докука^{1,2}, П.С. Коренев^{3,4}, Ю.В. Митришкин^{3,4}, Е.А. Павлова^{3,4}, М.И. Патров⁵, Р.Р. Хайрутдинов^{1,2}¹ГНЦ РФ ТРИНИТИ, Москва, Россия²НИИЦ «Курчатовский институт», Москва, Россия³Физический факультет МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия⁴Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, Москва, Россия⁵ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург, Россия

В вытянутых по вертикали токамаках для обеспечения работоспособности установок необходимо использовать системы управления положением плазмы как на лимитерной, так и на диверторной стадиях развития разряда. От качества этих систем зависят точность, быстродействие, устойчивость и надёжность управления не только положением плазмы, но также током и формой плазмы. Поэтому проблема разработки таких систем является важной и актуальной задачей современных токамаков. В данной работе по измеренным сигналам на магнитных петлях и поясах Роговского восстанавливается равновесие плазмы и относительно него строятся линейные модели в малых отклонениях. Полученные модели позволяют синтезировать методами H_∞ -теории оптимизации системы управления вертикальным и горизонтальным положением плазмы, ориентированные на работу со структурной неопределённостью моделей объекта. Эти системы применяются к плазмофизическому коду ДИНА, настроенному на плазму в токамаке Глобус-М. Применение разработанных систем на коде ДИНА позволило выявить сложную динамику магнитной конфигурации плазмы при тестировании замкнутой системы ступенчатыми функциями Хевисайда. Нахождение вблизи границы бифуркации в пространстве параметров неустойчивой плазмы дало возможность обнаружить скачкообразное изменение X -точки с верхней на нижнюю и наоборот. Разработка методики восстановления магнитной конфигурации плазмы по данным магнитной диагностики наряду с опытом создания систем с обратной связью для управления плазмой в токамаках обеспечило возможность синтезировать новые цифровые регуляторы для стабилизации вертикального и горизонтального положения плазмы. Это также позволило провести тестирование синтезированных цифровых регуляторов в замкнутом контуре системы управления положением плазмы, содержащей в качестве нелинейной модели плазмы код ДИНА.

Ключевые слова: токамак, управление, восстановление равновесия плазмы, линейные модели, H_∞ -регуляторы, бифуркация.

INVESTIGATION OF GLOBUS-M TOKAMAK POLOIDAL SYSTEM AND PLASMA POSITION CONTROL

V.N. Dokuka^{1,2}, P.S. Korenev^{3,4}, Yu.V. Mitrishkin^{3,4}, E.A. Pavlova^{3,4}, M.I. Patrov⁵, R.R. Khayrutdinov^{1,2}¹SSC RF TRINITI, Troitsk, Moscow, Russia²NRC «Kurchatov Institute», Moscow, Russia³Department of Physics, Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia⁴V.A. Trapeznikov Institute of Control Sciences of RAS, Moscow, Russia⁵Ioffe Institute of RAS, St. Petersburg, Russia

In order to provide efficient performance of tokamaks with vertically elongated plasma a position control system for limited and diverted plasma configuration is required. The accuracy, stability, speed of response, and reliability of plasma position control as well as plasma shape and current control depend on the performance of the control system. Therefore, the problem of the development of such systems is an important and actual task in modern tokamaks. In this study, the measured signals from the magnetic loops and Rogowski coils are used to reconstruct the plasma equilibrium, for which linear models in small deviations are constructed. We apply methods of the H_∞ optimization theory to synthesize control system for vertical and horizontal position of plasma, capable to work with structural uncertainty of the models of the plant. These systems are applied to the plasma-physical DINA code which is configured for the tokamak Globus-M plasma. The testing of the developed systems applied to DINA code with Heaviside's step functions have revealed the complex dynamics of plasma magnetic configurations. Being close to the bifurcation point in the parameter space of unstable plasma has made it possible to detect an abrupt change in the X -point position from the top to the bottom and vice versa. Development of the methods for reconstruction of plasma magnetic configurations and experience in designing plasma control systems with feedback for tokamaks provided an opportunity to synthesize new digital controllers for plasma vertical and horizontal position stabilization. It also allowed us to test the synthesized digital controllers in the closed loop of the control system with DINA code as a non-linear model of plasma.

Key words: tokamak, control, plasma equilibrium reconstruction, linear models, H_∞ -controllers, bifurcation

DOI: 10.21517/0202-3822-2016-39-3-80-90

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время в мире действует ряд токамаков с вытянутым по вертикали сечением, на которых изучаются вопросы физики высокотемпературной плазмы и проводятся исследования систем управле-

ния плазмой¹. К таким токамакам можно отнести DIII-D (США, 1986, 1,66; 0,67), JET (Англия, 1992, 3,00; 1,25—2,1), JT-60U (Япония, 1991, 3,40; 1,00), TCV (Швейцария, 1992, 0,88; 0,25—0,7), ASDEX Upgrade (Германия, 1991 1,65; 0,5—0,8), EAST (Китай, 2006, 1,75; 0,43), KSTAR (Южная Корея, 2008, 1,8; 0,5)². В Российской Федерации с 1999 г. эксплуатируется сферический токамак Глобус-М (1999, 0,36; 0,24) [1] в Физико-техническом институте им. А.Ф. Иоффе, а также сооружается вытянутый по вертикали токамак Т-15 (2018, 1,48; 0,67) в отделении токамаков КЯТК НИЦ «Курчатовский институт» [2].

В вытянутых токамаках управление вертикальным положением плазмы осуществляется как на лимитерной стадии разряда [3, 4], так и на диверторной, когда требуется управление и формой плазмы. При этом на диверторной фазе либо продолжается управление положением плазмы по вертикали совместно с управлением формой плазмы [3, 5—7], либо переходят к стабилизации вертикальной скорости плазмы относительно нулевого значения [8—10] при управлении формой плазмы. Во втором случае имеется риск потери устойчивости системой при данном переключении или возникновение нежелательных переходных процессов.

В данной работе решается задача стабилизации вертикального и горизонтального положения плазмы в токамаке Глобус-М на диверторной фазе разряда как на линейных моделях, полученных по экспериментальным данным [11], так и на плазмозфизическом коде ДИНА, настроенном на разряды в токамаке Глобус-М [12, 13].

ПОЛОИДАЛЬНАЯ МАГНИТНАЯ СИСТЕМА ТОКАМАКА ГЛОБУС-М

Используемая в расчётах конфигурация полоидальной магнитной системы токамака Глобус-М представлена на рис. 1 [1]. Катушка HFC (Horizontal Field Coil) используется для управления вертикальным положением плазмы, катушка VFC (Vertical Field Coil) — для управления горизонтальным положением. Для управления формой плазмы используются катушки PF (Poloidal Field): PF1, PF2 и PF3 и обмотки компенсации рассеянного поля соленоида CC (Compensation Coils): CC1, CC2 и CC3. Каждая рассматриваемая катушка состоит из верхней и нижней частей, расположенных симметрично относительно плоскости симметрии вакуумной камеры. Верхние и нижние части катушек соединены последовательно, за исключением частей катушки PF2, являющихся независимыми, и частей катушки HFC, соединённых встречно-последовательно.

Система магнитной диагностики токамака Глобус-М включает в себя 21 магнитную петлю для измерения полоидального потока в точках вне плазмы и пояса Роговского для измерения тока в обмотках полоидального поля, полного тока плазмы и суммарного тока в плазме и вакуумной камере.

Рис. 1. Конфигурация полоидальной магнитной системы токамака Глобус-М: — камера; ■ — PF-катушки; ◆ — петли; □ — центральный соленоид

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Целями работы являются синтез и моделирование систем управления с H_∞ -регуляторами в обратной связи [14] для вертикального и горизонтального положения плазмы в токамаке Глобус-М. Для достижения этих целей ставится серия задач:

- детальное изучение полоидальной системы токамака Глобус-М без плазмы;
- восстановление равновесия плазмы по сигналам на магнитных петлях и поясах Роговского;

¹ www.tokamak.info

² В скобках после названия установки указываются страна, год ввода токамака в эксплуатацию, а также большой и малый радиусы в метрах соответственно.

- построение линейных моделей плазмы в токамаке относительно восстановленных равновесий;
- синтез и моделирование H_∞ -регуляторов на линейных моделях;
- моделирование H_∞ -регуляторов на коде ДИНА;
- изучение поведения магнитной конфигурации плазмы при управлении её положением.

РАСЧЁТ МАГНИТНОГО ПОТОКА И ИНДУКТИВНОСТИ ПОЛОИДАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ

Полоидальный магнитный поток ψ в аксиально-симметричных установках определяется тороидальной плотностью тока J_ϕ в системе согласно уравнению равновесия [15, 16]

$$r \frac{\partial}{\partial r} \frac{1}{r} \frac{\partial \psi}{\partial r} + \frac{\partial^2 \psi}{\partial z^2} = -2\pi\mu_0 r J_\phi. \quad (1)$$

В отсутствие плазмы полоидальный поток в k -й петле рассчитывался согласно формуле

$$\Psi(r_k, z_k) = \int G(r_k, z_k, r', z') J_\phi dS' = \sum_j I_j M_{jk},$$

где I_j — ток в j -й обмотке; M_{jk} — взаимная индуктивность между j -й обмоткой и k -й петлёй.

Функция Грина G , удовлетворяющая требуемым граничным условиям на аксиальной оси и на бесконечности, имеет вид [16]

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

где K — эллиптический интеграл первого рода; E — эллиптический интеграл второго рода;

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

Расчёты индуктивностей в коде FCDI [11] выполнены по следующей методике. Поскольку на токамаке Глобус-М токи в полоидальной системе имеют характерный порядок 10^4 А, а измеряемые значения потока — порядок 10^{-1} Вб, для обеспечения погрешности вычислений порядка процента нужно использовать значения индуктивностей с погрешностью не более 10^{-7} Гн. При этом необходимо учитывать конечные размеры обмоток. Взаимная индуктивность j -й катушки и k -й магнитной петли вычисляется согласно формуле

$$M_{jk} = \frac{N_j}{S_j} \int_{S_j} G(r_k, z_k, r', z') dS'.$$

Здесь S_j и N_j — площадь полоидального сечения и количество витков j -й катушки соответственно. Аналогично рассчитываются взаимная индуктивность между j -й и i -й обмотками и собственная индуктивность j -й катушки:

$$M_{ji} = \frac{N_j N_i}{S_j S_i} \iint_{S_j S_i} G(r, z, r', z') dS dS';$$

$$L_j = \frac{N_j^2}{S_j^2} \iint_{S_j S_i} G(r, z, r', z') dS dS'.$$

Расчёт полоидальных потоков и индуктивностей был проведён кодами ДИНА [12, 13] и FCDI [11]. Рассчитанные индуктивности совпали в пределах допустимой погрешности и приведены в таблице.

Рассчитанные взаимные индуктивности полоидальной системы токамака Глобус-М, мкГн

Катушка	HFC	VFC	CS	PF1	PF2_верх	PF2_низ	PF3	CC
HFC	921	0	0	0	239	-239	0	0
VFC	0	955	31	49	163	163	511	595
CS	0	31	195	142	58	58	29	93
PF1	0	49	142	1351	267	267	52	311
PF2_верх	239	163	58	267	3158	27	181	1313
PF2_низ	-239	163	58	267	27	3158	181	1313
PF3	0	511	29	52	181	181	1224	902
CC	0	595	93	311	1313	1313	902	2906

Поскольку верхняя и нижняя секции катушки НФС соединены встречно, то потоки, создаваемые ими в последовательно соединённых обмотках, компенсируют друг друга. Этим объясняется наличие нулей в первой строке и первом столбце таблицы.

На рис. 2 показаны рассчитанные и измеренные значения полоидального потока на одной из петель токамака. Средняя ошибка расчёта полоидального потока составила 2%, однако на некоторых петлях максимальная ошибка достигала 12%, что допустимо в пределах инженерной точности.

Рис. 2. Сопоставление рассчитанного и измеренного значений полоидального потока на петле Д167 с координатами $R = 0,108$ м, $Z = -0,237$ м в разряде № 19 066 токамака Глобус-М: — FCDI; — ДИНА; — эксперимент

ВОССТАНОВЛЕНИЕ РАВНОВЕСИЯ ПЛАЗМЫ ПО ПОКАЗАНИЯМ МАГНИТНОЙ ДИАГНОСТИКИ

Для построения динамической модели плазмы необходимо знать распределение плотности тороидального тока, полоидального потока, форму и положение плазмы. Однако эти параметры не могут быть измерены непосредственно в ходе эксперимента и должны быть определены из измеряемых значений полоидального потока вне плазмы, полного тока плазмы и токов в обмотках токамака. Данная задача известна как задача восстановления равновесия плазмы, и для её решения применялся код FCDI (Flux and Current Distribution Identification) [6, 11].

Данный код использует представление плотности тороидального тока плазмы J_ϕ через давление плазмы p и полоидальный ток F , являющиеся неизвестными функциями полоидального потока ψ в (1) (уравнение Грэда—Шафранова [15, 16]):

$$J_\phi = r \frac{d}{d\psi} p(\psi) + \frac{\mu_0}{4\pi r} \frac{d}{d\psi} F^2(\psi).$$

Функции p и F итерационно аппроксимируются базисными функциями от нормированного полоидального потока

$$p(\psi_n) = \sum_l c_l^p f_l(\psi_n); \quad F(\psi_n) = \sum_l c_l^F f_l(\psi_n).$$

При заданных профилях p и F решается уравнение (1) и находится соответствующее распределение полоидального потока.

Коэффициенты c_l^p и c_l^F разложения на каждой итерации находятся минимизацией квадратичного функционала ошибки χ^2 между рассчитанными и измеренными показаниями магнитной диагностики:

$$\chi^2 = \sum_k \left(\frac{\psi(\mathbf{r}_k, c_l^p, c_l^F, I_j) - \psi_k^M}{\sigma_k^\psi} \right)^2 + \left(\frac{I_p(c_l^p, c_l^F) - I_p^M}{\sigma^{I_p}} \right)^2 + \sum_{j=1} \left(\frac{I_j - I_j^M}{\sigma_j^I} \right)^2,$$

где $\mathbf{r}_k$ — координатный вектор k -й магнитной петли; I_j — ток в j -й обмотке; I_p — полный ток плазмы; верхний символ M обозначает измеренное в эксперименте значение; σ_k^ψ , σ^{I_p} и σ_j^I соответствуют погрешностям полоидального потока на петлях, тока плазмы и тока в обмотках токамака.

Из найденных распределений полоидального потока и плотности тока плазмы находятся магнитные конфигурации плазмы в выбранных временных точках разряда и положение X -точки.

На рис. 3 показаны рассчитанные таким образом распределение полоидального потока и профиль плотности тороидального тока на 180 мс разряда № 31 648.

Рис. 3. Восстановленное распределение полоидального потока в виде двумерных линий уровня (а) и профиль плотности тороидального тока при $Z = Z_{\text{axis}}$ (б) для момента времени $t = 180$ мс разряда № 31 648 токамака Глобус-М

ПОСТРОЕНИЕ ЛИНЕЙНЫХ ДИНАМИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ

Используемая в работе динамическая модель плазмы основана на уравнении Кирхгофа для контуров тока

$$\frac{d}{dt}\Psi + RI = U.$$

Здесь Ψ — вектор-столбец магнитных потоков через контуры обмоток и элементы вакуумной камеры токамака; R — диагональная матрица активных сопротивлений контуров; I и U — векторы-столбцы токов и напряжений в рассматриваемых контурах соответственно. Линеаризуя уравнение Кирхгофа относительно восстановленных распределений полоидального потока ψ и плотности тороидального тока J плазмы [11], получим в отклонениях линейное дифференциальное уравнение вида

$$M\delta\dot{I} + \frac{\partial\Psi}{\partial R}(\psi, J)\delta\dot{r} + \frac{\partial\Psi}{\partial Z}(\psi, J)\delta\dot{z} + R\delta I = \delta U.$$

Векторы-столбцы $\frac{\partial\Psi}{\partial R}$ и $\frac{\partial\Psi}{\partial Z}$ зависят от восстановленного равновесия и описывают изменение магнитного потока через каждый контур при смещении магнитной оси плазмы. При этом мы считаем, что плазма не изменяет свою форму при смещении по вертикали и горизонтали (концепция «жёсткой модели» [17]) и пренебрегаем изменением тока плазмы.

Скорости изменения r и z плазмы можно связать со скоростью изменения вектора-столбца контурных токов. Сделать это можно следующим образом. Вертикальное и горизонтальное смещения плазмы δr и δz находятся из условия равенства нулю действующих на плазму сил:

$$\begin{aligned}\frac{\partial}{\partial r}F_r(\psi, J)\delta r + \frac{\partial}{\partial I}F_r(\psi, J)\delta I &= 0; \\ \frac{\partial}{\partial z}F_z(\psi, J)\delta z + \frac{\partial}{\partial I}F_z(\psi, J)\delta I &= 0.\end{aligned}$$

В итоге линейная динамическая модель плазмы в магнитном поле токамака принимает вид

$$\begin{aligned}\delta \dot{I} &= A \delta I + B \delta U; \\ y &= C \delta I,\end{aligned}\quad (2)$$

где

$$\begin{aligned}A &= - \left(M - \frac{\partial \Psi}{\partial r} \frac{\partial F_R}{\partial I} \Big/ \frac{\partial F_R}{\partial r} - \frac{\partial \Psi}{\partial z} \frac{\partial F_Z}{\partial I} \Big/ \frac{\partial F_Z}{\partial z} \right)^{-1} R; \\ B &= \left(M - \frac{\partial \Psi}{\partial r} \frac{\partial F_R}{\partial I} \Big/ \frac{\partial F_R}{\partial r} - \frac{\partial \Psi}{\partial z} \frac{\partial F_Z}{\partial I} \Big/ \frac{\partial F_Z}{\partial z} \right)^{-1} \begin{bmatrix} E_{N \times N} \\ 0_{N \times K} \end{bmatrix}; \\ C &= - \begin{bmatrix} \frac{\partial F_Z}{\partial I} \Big/ \frac{\partial F_Z}{\partial z} & \frac{\partial F_R}{\partial I} \Big/ \frac{\partial F_R}{\partial r} \end{bmatrix}^T.\end{aligned}$$

Здесь E — единичная матрица; N — количество обмоток токамака; K — количество элементов камеры (для токамака Глобус-М это 8 и 71 соответственно). Выходами модели y являются смещения магнитной оси плазмы по вертикали и горизонтали.

СИНТЕЗ H_∞ -РЕГУЛЯТОРОВ

При разработке системы управления положением плазмы в токамаке Глобус-М использовалась линейная модель (1) в пространстве состояний с двумя входами U_{HFC} , U_{VFC} — напряжениями на обмотках управления и двумя выходами δz , δr — смещениями положения плазмы по вертикали и горизонтали для квазистационарной стадии плазменного разряда (на 180 мс) [11]. Структурная схема двухконтурной системы управления плазмой, на которой исполнительными устройствами являются инверторы тока [4], представлена на рис. 4.

Рис. 4. Структурная схема двухконтурной системы стабилизации вертикального и горизонтального положения плазмы

Синтез регуляторов для контуров вертикальной [18] и горизонтальной стабилизации осуществлён методом H_∞ -оптимизации, основанным на взаимно простой факторизации передаточной функции модели объекта $G = M^{-1}N$ [19]. При этом запас устойчивости полученных регуляторов $\varepsilon = 0,33$ для контура управления вертикальным положением и $\varepsilon = 0,37$ для контура управления горизонтальным положением. Здесь $\|\Delta_N \Delta_M\|_\infty < \varepsilon$ является H_∞ -нормой пары неопределённых устойчивых передаточных функций Δ_N , Δ_M , в сомножителях факторизации возмущённой модели объекта $G_\Delta = (M + \Delta_M)^{-1}(N + \Delta_N)$. Под запасом устойчивости понимается величина H_∞ -нормы наибольшей структурной неопределённости Δ_N , Δ_M в модели объекта, при которой замкнутая система ещё сохраняет устойчивость.

Для упрощения и оптимизации полученных регуляторов положения плазмы была произведена редукция. Общий принцип редукции состоит в отбрасывании тех состояний, которые вносят наименьший вклад в общую взаимосвязь между входами и выходами системы в базисе внутренне сбалансированной реализации [20]. При этом для устойчивых регуляторов K были найдены аппроксимирующие модели низкого порядка K_a такие, что норма их разности $\|K - K_a\|_\infty$ является достаточно малой. Была произведена дискретизация регуляторов с периодом 10 мкс.

При численном эксперименте на вход замкнутой системы управления подавалось возмущение 1 см по вертикальному и 0 см по горизонтальному положению. Результаты моделирования показаны на рис. 5. Статистическая ошибка составляет 0,1 мм, время переходного процесса 2 мс.

Рис. 5. Смещение положения плазмы при работе контуров системы стабилизации для линейной модели: *a* — вертикальное смещение δz , задающее воздействие r_z , ошибка $e_z = r_z - \delta z$, м; *б* — ток в катушке HFC; *в* — управляющее напряжение HFC; *г* — горизонтальное смещение δr , задающее воздействие r_r , ошибка $e_r = r_r - \delta r$, м; *д* — ток в катушке VFC; *е* — управляющее напряжение VFC

МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ ПОЛОЖЕНИЕМ ПЛАЗМЫ НА КОДЕ ДИНА

Моделирование системы стабилизации вертикального положения плазмы. Синтезированные H_∞ -регуляторы были протестированы на коде ДИНА [12, 13] в структурной схеме системы управления (см. рис. 4), которая была исследована на линейной модели плазмы (2). На первом этапе моделировался только один контур стабилизации вертикального положения плазмы. В качестве задающего воздействия (уставки) на систему управления подавалась ступенчатая функция времени (рис. 6, *a*), которая вызывала изменение тока в катушке HFC (рис. 6, *б*) и вертикального положения плазмы (см. рис. 6, *a*) из-за наличия обратной связи в системе, замкнутой через исполнительное устройство и регулятор (см. рис. 4). Моделировался промежуток плазменного разряда № 31 648 со 185 до 195 мс длительностью 10 мс. В процессе моделирования ток и температура плазмы считались постоянными.

Рис. 6. Уставка и смещение вертикального положения магнитной оси плазмы (*a*) и ток в катушке HFC (*б*)

В начальный момент времени плазма находится в конфигурации с верхней X-точкой и вертикальной координатой магнитной оси, равной 15,8 мм (рис. 7, *а*). Уставка по вертикальной координате равняется 16 мм (см. рис. 6, *а*). По истечении 1 мс уставка скачкообразно изменяется до 0. При этом система стабилизации смещает плазму вниз и в ходе перерегулирования на интервале времени со 186,2 до 186,8 мс образуется нижняя X-точка (см. рис. 6, *б*). По окончании перерегулирования плазма возвращается в конфигурацию с верхней X-точкой (рис. 7, *в*).

Рис. 7. Эволюция магнитной конфигурации плазмы при моделировании работы контура системы вертикальной стабилизации: *а* — начало моделирования, время 0,18548 с, ток 151 880 А; *б* — перерегулирование, время 0,18648 с, ток 151 880 А; *в* — конец моделирования, время 0,19498 с, ток 151 880 А

Такое качественное изменение магнитной конфигурации плазмы можно объяснить тем, что вертикальное положение плазмы при своём принудительном изменении посредством системы с обратной связью проходит через границу в пространстве параметров, разделяющую это пространство на области с качественно разными плазменными конфигурациями, т.е. это бифуркация.

Моделирование систем стабилизации вертикального и горизонтального положения плазмы. На втором этапе моделирования на коде ДИНА применялась двухконтурная система одновременной стабилизации вертикального и горизонтального положения плазмы (см. рис. 4). Моделировался промежуток разряда со 185 до 195 мс длительностью 10 мс. При моделировании ток и температура плазмы считались постоянными. В начальный момент времени плазма находится в конфигурации с верхней X-точкой (рис. 8, *а*) и вертикаль-

Рис. 8. Эволюция конфигурации плазмы при моделировании работы контуров системы стабилизации вертикального и горизонтального положения плазмы: *а* — начало моделирования, время 0,18548 с, ток 151 880 А; *б* — перерегулирование, время 0,18698 с, ток 151 880 А; *в* — конец моделирования, время 0,19498 с, ток 151 880 А

ной координатой магнитной оси, равной 15,8 мм, уставка по вертикальной координате равняется 16 мм (рис. 9, а). Программное (заданное) значение горизонтального положения магнитной оси равно 39 см на протяжении всего процесса моделирования, и горизонтальное положение поддерживается системой управления примерно постоянным (рис. 9, б). По истечении 1 мс уставка вертикального положения плазмы испытывает положительный скачок до 26 мм (см. рис. 9, а). При этом система стабилизации смещает плазму вверх (см. рис. 8, б, в) с соответствующими изменениями токов в катушках НФС (см. рис. 9, а) и VFC (см. рис. 9, б). В этом случае нет перехода границы бифуркации, и при таком смещении плазма сохраняет конфигурацию с верхней X -точкой (см. рис. 8, а—в).

Рис. 9. Изменение вертикального положения магнитной оси, напряжения и тока в обмотке управления по вертикали НФС (а) и изменение горизонтального положения магнитной оси, напряжения и тока в обмотке управления по горизонтали VFC (б)

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основными результатами работы являются разработка двухконтурной системы стабилизации положения плазмы по вертикальной и горизонтальной координатам для действующего сферического токамака Глобус-М [1] и проведение её тестирования на коде ДИНА [12, 13]. При разработке системы управления применён метод построения линейной модели плазмы по экспериментальным данным относительно восстановленного равновесия плазмы по измерениям вне плазмы [11]. H_{∞} -регуляторы [19], синтезированные для полученных линейных моделей и обеспечивающие работоспособность замкнутой системы, были протестированы на коде ДИНА в структурной схеме замкнутой системы управления (см. рис. 4). В процессе моделирования системы управления положением плазмы на коде ДИНА не учитывались процессы переноса частиц и энергии.

Двухконтурная система стабилизации положения плазмы на токамаке Глобус-М была разработана и сделана к. техн. н. Е.А. Кузнецовым (ГНЦ РФ ТРИНИТИ) [4] и работает более 10 лет. В этой системе в качестве исполнительных устройств по двум каналам используются инверторы тока [4], регуляторы были реализованы в виде стандартных аналоговых схем с пропорциональным интегрально-дифференцирующим

(ПИД) законом управления. Первое применение ПИД-регулятора для стабилизации вертикального положения плазмы на коде ДИНА для установки Глобус-М было осуществлено в [21].

В настоящей работе были тестированы на коде ДИНА более прогрессивные регуляторы для вертикального и горизонтального положения плазмы, синтезированные посредством H_∞ -теории управления [19]. При этом регуляторы применялись в цифровом виде при их дискретизации с периодом 10 мкс. В качестве моделей инверторов тока использовались их линеаризованные звенья как коэффициенты пропорциональности между входной и выходной величинами (см. рис. 4).

Следующим этапом данной работы может быть применение на коде ДИНА системы управления током и формой плазмы с кодом восстановления равновесия в обратной связи и выравниванием магнитных потоков на сепаратрисе [22] с последующим внедрением этой системы в практику физического эксперимента на токамаке ГЛОБУС-М.

REFERENCES

1. Gusev V., Azizov E., Alekseev A. et al. Globus-M results as the basis for a compact spherical tokamak with enhanced parameters Globus-M2. — Nuclear Fusion, 2013, vol. 53, № 9, p. 093013.
2. Azizov E., Khvostenko P., Belyakov V., Bondarchuk E., Filatov O., Krylov V., Melnikov A., Mineev A., Sokolov M., Sushkov A. Status of upgrading project of tokamak T-15. — In: 25th Fusion Energy Conf. (FEC 2014). Saint Petersburg, Russia, 13—18 October 2014. URL: <http://www-pub.iaea.org/iaea meetings/46091/25th-Fusion-Energy-Conference-FEC-2014>.
3. Yuan Q.P., Xiao B.J., Luo Z.P., Walker M.L., Welandar A.S., Hyatt A., Qian J.P., Zhang R.R., Humphreys D.A., Leuer J.A., Johnson R.D., Penafior B.G., Mueller D. Plasma current, position and shape feedback control on EAST. — Nuclear Fusion, 2013, vol. 53, № 4, p. 043009.
4. Kuznetsov E.A., Mitrishkin Yu.V. Self-oscillatory stabilization system of unstable vertical plasma position in GLOBUS-M spherical tokamak. — M.: Pub.house of V. A. Trapeznikov Institute of Control Sciences of Russian Academy of Sciences, 2005. 71 p. (in Russian).
5. Mertens V., Raupp G., Treutterer W. Chapter 3: plasma control in ASDEX upgrade. — Fusion Science and Technology, 2003, vol. 44, pp. 593—604.
6. Mitrishkin Y.V., Korenev P.S., Kartsev N.M., Patrov M.I. Plasma shape control with a linear model for Globus-M tokamak. — In: 41st EPS Conf. on Plasma Physics. Berlin, Germany, June 23—27, 2014, P4.054.
7. Mitrishkin Y.V., Kartsev N.M. Hierarchical plasma shape, position, and current control system for ITER. — In: Proc. the 50th IEEE Conf. on Decision and Control. Orlando, FL, USA, 2011, pp. 2620—2625.
8. Bellizio T., Albanese R., Ambrosino G., Ariola V., Artaserse G., Crisanti F., Coccoresse V., Tommasi G.D., Lomas P.J., Maviglia F., Neto A., Pironti A., Rimini F., Sartori F., Vitelli R., Zabeo L. and JET EFDA Contributors. Control of elongated plasma in presence of ELMs in the JET Tokamak. — IEEE Transactions on Nuclear Science, 2011, vol. 58, № 4, pp. 1497—1502.
9. Gribov Y., Kavin A., Lukash V., Khayrutdinov R., Huijsmans G.T.A., Loarte A., Snipes J.A., Zabeo L. Plasma vertical stabilization in ITER. — Nucl. Fusion, 2015, vol. 55, p. 073021.
10. Dokuka V.N., Kavin A.A., Lukash V.E., Sokolov M.M., Khayrutdinov R.R., Khayrutdinova V.A. Numerical simulation of plasma control in modernized tokamak T-15. — VANT. Ser. Termoyadernyi sintez (Problems of Atomic Science and Technology. Ser. Thermonuclear Fusion), 2014, vol. 37, issue 3, pp. 56—70 (in Russian).
11. Korenev P.S., Mitrishkin Yu.V., Patrov M.I. Reconstruction of the equilibrium distribution of the tokamak plasma parameters by external magnetic measurements and construction of linear plasma models. — Mekhatronika, avtomatizatsiya i upravlenie (Mechatronics, automation and control), 2016, vol. 17, № 4, pp. 254—265 (in Russian).
12. Khayrutdinov R.R., Lukash V.E. Studies of plasma equilibrium and transport in a tokamak fusion device with the Inverse-variable technique. — J. Comput. Physics, 1993, vol. 109, pp. 193—201.
13. Lukash V.E., Dokuka V.N., Khayrutdinov R.R. Simulation code DINA into MATLAB environment for development of tokamak plasma control design. — VANT. Ser. Termoyadernyi sintez (Problems of Atomic Science and Technology. Ser. Thermonuclear Fusion), 2004, issue 1, pp. 40—49 (in Russian).
14. Mitrishkin Yu.V., Lukash V.E., Khayrutdinov R.R. Plasma current, position and shape robust control system in ITER. — VANT. Ser. Termoyadernyi sintez (Problems of Atomic Science and Technology. Ser. Thermonuclear Fusion) BAHТ, 2005, issue 1, pp. 61—81 (in Russian).
15. Shafranov V.D. The plasma equilibrium in a magnetic field. — Voprosy teorii plazmy (Problems of Plasma Theory), 1963, issue 2, pp. 92—131 (in Russian).
16. Ariola M., Pironti A. Magnetic Control of Tokamak Plasmas. — Springer, 2008.

17. **Walker M.L., Humphreys D.A.** Valid coordinate systems for linearized plasma shape response models in tokamaks. — *Fusion Science and Technology*, 2006, vol. 50, pp. 473—489.
18. **Mitrishkin Y.V., Pavlova E.A., Kuznetsov E.A., Gaydamaka K.I.** Continuous, saturation, and discontinuous tokamak plasma vertical position control systems. — *Fusion Engineering and Design*, 2016, vol. 108, pp. 35—47.
19. **Mcfarlane D.C., Glover K.** Robust controller design using normalized coprime factor plant descriptions. Springer Verlag. — *Lecture Notes in Control and Information Sciences*, 1989, vol. 138.
20. **Datta B.N.** Numerical methods for linear control systems. Design and analysis. — Elsevier Academic Press, 2004.
21. **Dokuka V.N., Gusev V.K., Khayrutdinov R.R., Kuznetsov E.A., Levin R.G., Sakharov N.V.** Simulation of vertical plasma position control system of GLOBUS-M tokamak in frame of simulink-DINA concept. — In: 31th European Physical Society Conf. on Plasma Physics. London, 28 June — 2 July, 2004, P1-180.
22. **Prokhorov A.A., Mitrishkin Yu.V.** Imitation modeling of a plasma shape control system in tokamak by method of poloidal magnetic fluxes alignment at the separatrix. — In coll.: 7-th All-Russia scientific-practical conference «Imitation modeling. Theory and practice» (IMMOD-2015). V. A. Trapeznikov Institute of Control Sciences RAS. Moscow, 21—23 October 2015. In 2 vol. Under the editorship of S.N. Vasil'ev, R.M. Yusupov, vol. 2, pp. 291—296 (in Russian).

AUTHORS

Dokuka V.N. SRC of Russian Federation, Troitsk Institute for Innovation and Fusion Research, ul. Pushkovykh 12, 142190 Troitsk, Moscow, Russia; NRC «Kurchatov Institute», pl. Akademika Kurchatova 1, 123182 Moscow, Russia; v.dokuka@mail.ru

Kornev P.S. Department of Physics, Lomonosov Moscow State University, Leninskie gory 1 str. 2, GSP-1, 119991 Moscow, Russia; V. A. Trapeznikov Institute of Control Sciences, Russian Academy of Sciences, Profsoyuznaya str. 65, 117997 Moscow, Russia

Mitrishkin Yu.V. Department of Physics, Lomonosov Moscow State University, Leninskie gory 1 str. 2, GSP-1, 119991 Moscow, Russia; V. A. Trapeznikov Institute of Control Sciences, Russian Academy of Sciences, Profsoyuznaya str. 65, 117997 Moscow, Russia

Pavlova E.A. Department of Physics, Lomonosov Moscow State University, Leninskie gory 1 str. 2, GSP-1, 119991 Moscow, Russia; V. A. Trapeznikov Institute of Control Sciences, Russian Academy of Sciences, Profsoyuznaya str. 65, 117997 Moscow, Russia

Patrov M.I. A.F. Ioffe Physical-Technical Institute of the Russian Academy of Sciences, Politechnicheskaya ul. 26, 194021 St. Petersburg, Russia

Khayrutdinov R.R. SRC of Russian Federation, Troitsk Institute for Innovation and Fusion Research, ul. Pushkovykh 12, 142190 Troitsk, Moscow, Russia; NRC «Kurchatov Institute», pl. Akademika Kurchatova 1, 123182 Moscow, Russia; khayrutd@mail.ru

Received 22 May 2016
Problems of Atomic Science and Technology
Ser. Thermonuclear Fusion, 2016, vol. 39, issue 3, pp. 80—90.