УДК 681.51:621.3.002.5:621.039.6:533.95

# СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ПОЛОЖЕНИЕМ, ФОРМОЙ И ТОКОМ ПЛАЗМЫ В ТОКАМАКЕ Т-15

С.М. Зенков, Ю.В. Митришкин, Е.К. Фокина

Рассмотрены вопросы разработки и математического моделирования магнитных систем управления формой, током и вертикальным положением плазмы в токамаке T-15. Проанализированы две системы магнитного управления плазмой: двухкаскадная система с развязкой каналов управления и многомерным  $H_{\infty}$ -регулятором при импульсной стабилизации вертикального положения плазмы посредством ШИМ-элемента и система управления на основе оценки вектора состояния в дискретном времени, использующая наблюдатель состояния в обратной связи.

**Ключевые слова:** плазма, токамак, обратная связь, развязка каналов управления,  $H_{\infty}$ -робастная система управления, наблюдатель состояния, размещение полюсов, линейно-квадратичная задача.

### ВВЕДЕНИЕ

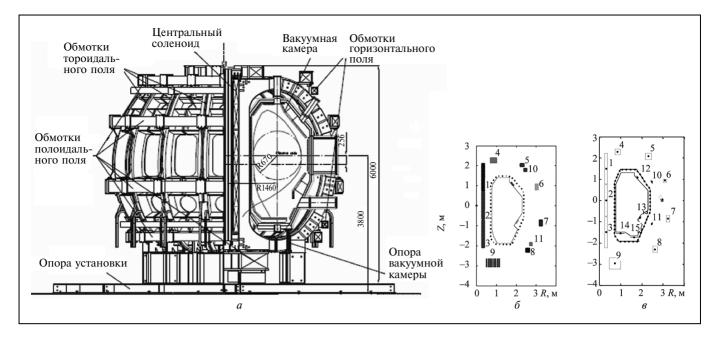
Тороидальные аксиально-симметричные магнитные конфигурации, окруженные магнитными катушками, называются токамаками (рис. 1, a) [1]. Они предназначены для удержания высокотемпературной плазмы с целью получения в будущем энергии от слияния ядер легких элементов. В современных токамаках плазма вытянута по вертикали, т. е. имеет D-образное сечение с вытянутостью 1,5 и более (вытянутость — отношение большой полуоси к малой вертикального сечения плазмы). В такой конфигурации отношение давления плазмы к давлению внешнего магнитного поля более чем в два раза выше, чем в токамаках круглого сечения [2]. Вытянутость приводит к неустойчивости плазмы в вертикальном направлении, что является платой за улучшение параметров плазмы посредством ее вертикального вытягивания.

При проектировании современных токамаков необходима разработка систем управления для подавления вертикальной неустойчивости плазмы и стабилизации ее формы и тока. Управление формой и током плазмы в токамаках осуществляется с помощью полоидального магнитного поля, создаваемого магнитными обмотками центрального со-

леноида и дополнительными обмотками, расположенными вокруг камеры токамака. Для подавления вертикальной неустойчивости плазмы, как правило, применяются обмотки горизонтального поля. Без подобных систем магнитного управления плазмой вытянутые по вертикали токамаки неработоспособны.

В данной работе изучаются возможности управления плазмой в токамаке Т-15, проект которого был анонсирован в 2010 г. [3]. Токамак Т-15 будет создаваться в Институте физики токамаков (НИЦ «Курчатовский институт», г. Москва). Для проектирования систем управления плазмой используется линейная модель плазмы для этого токамака, полученная путем линеаризации на квазистационарной стадии плазменного разряда плазмо-физического кода DINA, разработанного в Троицком институте инновационных и термоядерных исследований [4]. Разработка системы магнитного управления плазмой в токамаке Т-15 продолжает цикл работ по управлению плазмой, проводимых в Институте проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН для проекта ITER (www.iter.org) [5—15]. Это связано с тем, что полоидальная система токамака Т-15 подобна магнитной системе ITER. поскольку обмотки полоидального магнитного поля расположены аналогично вокруг ваку-





умной камеры токамака. Разработанные системы управления плазмой моделировались в программно-вычислительной среде MATLAB/Simulink.

### 1. ОБЪЕКТ УПРАВЛЕНИЯ

Объектом управления в данной работе служит плазма в токамаке Т-15, имеющим следующие параметры: большой радиус 1,48 м, тороидальное поле с индукцией 2 Т, ток плазмы 2 МА, вытянутость 1,9, аспектное отношение 2,2, планируемая длительность импульса 10 с [3]. Магнитная система токамака Т-15 включает в себя обмотку тороидального поля, 3 обмотки центрального соленоида CS<sub>1-3</sub> (Central Solenoid), 6 обмоток полоидального поля PF<sub>1-6</sub> (Poloidal Field), и обмотку горизонтального поля HFC (Horizon Field Coil) (рис. 1, a). В начальном варианте проекта токамака Т-15 обмотка HFC располагалась рядом с обмотками полоидального поля (рис. 1 a,  $\delta$ ) [3]. В результате проведенного исследования управляемости вертикального положения плазмы при различном расположении обмотки НГС [16—19] было показано, что начальное расположение обмотки НFC вне тороидальной обмотки не эффективно. Поэтому было принято решение разместить обмотку HFC между камерой токамака и обмоткой тороидального поля (рис. 1,  $\theta$ ).

# 2. ЛИНЕЙНАЯ МОДЕЛЬ ПЛАЗМЫ В ТОКАМАКЕ

Линейная модель плазмы, пассивных и управляющих структур в токамаке T-15 имеет вид линейной стационарной системы уравнений в пространстве состояний

$$\dot{x}_1 = A_1 x_1 + B_1 u_1 + E \dot{w},$$
  

$$y_1 = C_1 x_1 + D_1 u_1 + F w,$$
(1)

где  $A_1 \in \mathbb{R}^{64 \times 64}, B_1 \in \mathbb{R}^{64 \times 10}, C_1 \in \mathbb{R}^{19 \times 64}, D_1 \in \mathbb{R}^{19 \times 10},$   $E \in \mathbb{R}^{64 \times 2}, F \in \mathbb{R}^{19 \times 2}$  — матрицы модели  $(D_1 = 0),$   $y_1 = [\delta Z \ \delta g^T \ \delta I_p \ \delta I_{coils}^T \ \delta R]^T$  — выходной вектор сигналов, где  $\delta Z$  — вертикальное смещение магнитной оси плазмы,  $\delta g$  — смещение шести зазоров между сепаратрисой плазмы и первой стенкой,  $\delta I_p$  — вариация тока плазмы,  $\delta I_{coils}$  — вариации токов в CS/PF/HFC обмотках,  $\delta R$  — горизонтальное смещение магнитной оси плазмы.

Вектор входных воздействий  $u = [U_{CS}^T \ U_{PF}^T \ U_{HFC}]^T$ , где  $U_{CS}$  — напряжения на секциях центрального соленоида,  $U_{PF}$  — напряжения на обмотках PF,  $U_{HFC}$  — напряжение на обмотке HFC. Вектор  $w = [\delta \beta_p \ \delta l_i]^T$  описывает возмущение, его компоненты состоят из сбросов относительного давления плазмы  $\beta_p$  и внутренней индуктивности плазмы  $l_i$  [1, 2]. Компоненты вектора состояния мо-



дели  $x_1$  представляют собой вариации токов в пассивных структурах и активных (управляющих) обмотках. Эволюция возмущающих параметров задается выражениями  $\delta\beta_p = \delta\beta_{p0}h(t-t_{dist}),$   $\delta l_i = \delta l_{i0}h(t-t_{dist}),$  где h(t) — единичная ступенчатая функция Хевисайда,  $t_{disr}$  — момент времени возникновения возмущения,  $\delta\beta_{p0} = -0.01$  и  $\delta l_{i0} = -0.035$  — это значения сбросов  $\beta_p$  и  $l_i$  соответственно. Такой вид возмущения моделирует явление малого срыва в токамаке [1].

### 3. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Основная задача данной работы состоит в разработке и анализе различных систем управления вертикальным положением, током и формой плазмы в токамаке Т-15. Каждая из систем должна обеспечивать устойчивость плазменных параметров при возмущении типа «малый срыв». Также системы должны отрабатывать уставку по вертикальному положению плазмы с приемлемым быстродействием.

Рассматриваются многосвязные системы, реализующие два подхода:

- развязка девяти каналов управления со стабилизацией вертикального положения плазмы и применение многомерного  $H_{\infty}$ -регулятора;
- стабилизация объекта и задание желаемой динамики замкнутой системы через оценку вектора состояния.

### 4. ДВУХКАСКАДНАЯ СИСТЕМА

Эта система управления положением, формой и током плазмы в токамаке T-15 структурно включает в себя следующие составляющие [16]: скалярный контур импульсной стабилизации вертикального положения плазмы, многомерный каскад развязки каналов управления и каскад с многомерным  $H_{\infty}$ -регулятором (рис. 2).

Особенность линейных моделей вытянутой по вертикали плазмы заключается в наличии единственного неустойчивого полюса, определяющего неустойчивую моду вертикального движения плазмы. Перед последующей развязкой каналов управления целесообразно предварительно стабилизировать объект управления [16—19]. Скалярный контур стабилизации включает в себя скалярную модель плазмы с входом  $U_{HFC}$  и выходом  $\delta Z$ , пропорциональный регулятор с коэффициентом усиления  $K_z=10^5$  и модель исполнительного устройства — инвертора напряжения [20, 21], работающего в режиме широтно-импульсной модуляции (ШИМ) с частотой 200 Гц и амплитудой выходного сигнала 400 В. На вход регулятора подается сиг-

нал рассогласования по вертикальному положению плазмы Z, выходом исполнительного устройства служит напряжение на обмотке горизонтального поля  $U_{HFC}$ .

### 4.1. Развязка каналов управления

Развязка каналов управления осуществляется с помощью матрицы прямой цепи  $K_{sp}$  и матрицы обратной связи  $K_{fb}$  (рис. 2) [9] для девяти каналов управления с использованием напряжений и токов трех обмоток центрального соленоида  $\mathrm{CS}_{1-3}$  и шести обмоток полоидального поля  $\mathrm{PF}_{1-6}$ .

Редуцируем исходную систему (1) до девятого порядка [22]. На рис. З приведены ганкелевы сингулярные числа [22] исходной системы, показывающие возможность такой редукции. Видно, что наибольшее влияние на составляющие выходного вектора  $y_1$  в выражении (1) оказывают первые де-

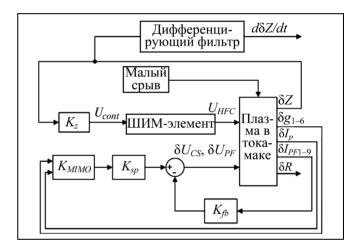


Рис. 2. Двухкаскадная система управления формой и током плазмы в токамаке Т-15 с импульсным контуром стабилизации вертикального положения плазмы

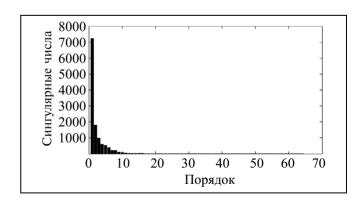


Рис. 3. Ганкелевы сингулярные числа стабилизированной нередуцированной системы



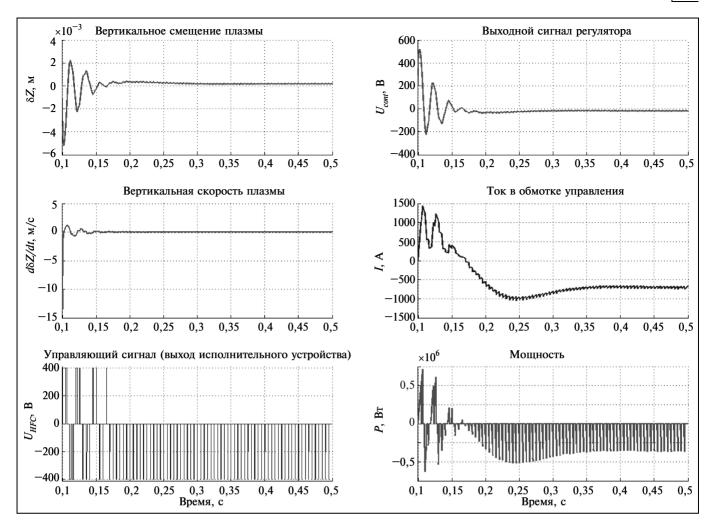


Рис. 4. Иллюстрация работы скалярного контура подавления вертикальной неустойчивости плазмы в двухкаскадной системе управления положением, формой и током плазмы в токамаке T-15 при возмущении типа «малый срыв»

вять составляющих вектора состояния  $x_1$  в сбалансированной реализации модели объекта управления. Это связано с особенностями модели объекта управления — каждую составляющую выходного вектора  $y_1$  можно приближенно представить в виде линейной комбинации токов в обмотках управления и пассивных контурах.

Рассмотрим подсистему, включающую в себя в качестве входов только девять напряжений  $U_{CS}$  и  $U_{PF}$  и девять вариаций токов в обмотках центрального соленоида и обмотках полоидальных полей  $\delta I_{coils}$ . Поскольку матрица  $D_1$  нулевая, эту подсистему можно представить следующим образом:

$$\dot{x}_2 = A_2 x_2 + B_2 u_2, \ y_2 = C_2 x, \tag{2}$$

где  $A_2 \in \mathbb{R}^{9 \times 9}$ ,  $B_2 \in \mathbb{R}^{9 \times 9}$ ,  $C_2 \in \mathbb{R}^{9 \times 9}$ ,  $u_2 \in \mathbb{R}^{9 \times 1}$ ,  $x_2 \in \mathbb{R}^{9 \times 1}$ . Зададим управление в виде:  $u_2 = K_{sp}r - K_{fb}y_2$ , где  $K_{sp} \in \mathbb{R}^{9 \times 9}$  — матрица прямой цепи,

 $K_{fb} \in \mathbb{R}^{9 \times 9}$  — матрица обратной связи,  $r \in \mathbb{R}^{9 \times 1}$  — векторный сигнал-уставка по токам в обмотках управления. Тогда система (2) преобразуется к виду  $\dot{x}_2 = \Lambda x_2 + B_2 K_{sp} r, \, y_2 = C_2 x_2, \, \text{где } \Lambda = A_2 - B_2 K_{fb} C_2$  — матрица замкнутой подсистемы, которая выбирается диагональной для развязки каналов управления с желаемыми значениями собственных чисел для обеспечения приемлемой динамики подсистемы с обратной связью. На основе этой матрицы, матрицы  $K_{sp}$  и  $K_{fb}$  вычисляются как  $K_{fb} = B_2^{-1} (A_2 - \Lambda) C_2^{-1}, \, K_{sp} = -B_2^{-1} \Lambda C_2^{-1}.$ 

# 4.2. Многомерный $H_{\infty}$ -регулятор

Многомерный  $H_{\infty}$ -регулятор входит во внешний каскад двухкаскадной системы управления (блок  $K_{MIMO}$ , см. рис. 2). На вход регулятора подаются сигналы вариаций шести зазоров  $\delta g_{1-6}$  и тока



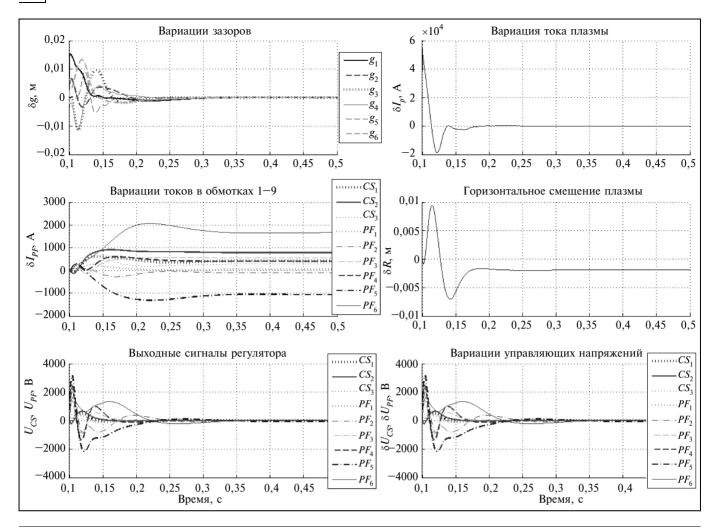


Рис. 5. Иллюстрация работы многомерного контура двухкаскадной системы управления положением, формой и током плазмы в токамаке T-15 при подаче возмущения типа «малый срыв»

плазмы  $\delta I_p$ , а выходами являются задающие воздействия по токам в обмотках управления, поступающие на матрицу  $K_{sp}$  внутреннего каскада системы. Регулятор получен методом  $H_{\infty}$ -синтеза (loop shaping) с применением нормализованной взаимно простой факторизации передаточной функции модели объекта  $G=M^{-1}N$  [23]. При этом достигнут запас робастной устойчивости  $\varepsilon_{\max}=0,254$ , где  $\varepsilon=\|\Delta_N \Delta_M\|_{\infty}-H_{\infty}$ -норма пары неопределенных устойчивых передаточных функций  $\Delta_N$ ,  $\Delta_M$  в сомножителях факторизации возмущенной модели  $G_p=(M+\Delta_M)^{-1}(N+\Delta_N)$ .

# 4.3. Численный эксперимент

Работа системы тестировалась путем моделирования возмущения типа «малый срыв» (см. § 2). Результаты моделирования приведены на рис. 4 и 5.

Система обеспечивает устойчивость всех управляемых плазменных параметров (вертикального

положения, зазоров и тока плазмы) при возмущении типа «малый срыв», время переходного процесса составляет около 0,1 с, а статическая ошибка по всем трем параметрам близка к нулю.

# 5. СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ПО ОЦЕНКЕ ВЕКТОРА СОСТОЯНИЯ

Вторая из рассматриваемых в данной статье систем — это система управления положением, током и формой плазмы по оценке вектора состояния с помощью наблюдателя. Она включает в себя наблюдатель вектора состояния и матрицу регулятора обратной связи, задающую размещение полюсов для получения желаемой динамики замкнутой системы. В отличие от двухкаскадной системы управления, разработка и тестирование данной системы проводились в дискретном времени с учетом транспортного запаздывания в моделях исполнительных устройств. Исследовалась возможность стабилизации плазмы по вертикали, исполь-

ĥ



зуя только девять управляющих CS/PF обмоток. без обмотки горизонтального поля НГС.

# 5.1. Стабилизация объекта управления по оценке вектора состояния

Система управления плазмой в токамаке Т-15 будет работать в дискретном времени с тактом в 1,1 мс, поэтому модель (1) в непрерывном времени была дискретизирована с периодом дискретизации в 1,1 мс и приведена к системе разностных уравнений:

$$x(n+1) = Ax(n) + Bu(n), y(n) = Cx(n),$$
 (3)  
 $\in \mathbb{N}^+$  — номер шага молелирования.  $A \in \mathbb{R}^{64 \times 64}$ 

где  $n \in \mathbb{N}^+$  — номер шага моделирования,  $A \in \mathbb{R}^{64 \times 64}$ ,  $B \in \mathbb{R}^{64 \times 10}, \ C \in \mathbb{R}^{19 \times 64}$  — матрицы дискретной линейной модели.

Также на каждом входе модели объекта (3) была добавлена модель исполнительного устройства (многофазного тиристорного управляемого выпрямителя) с транспортным запаздыванием в 3,3 мс. Добавление моделей выпрямителя по каждому из девяти входов привело к повышению общего порядка системы до 91. Это связано с тем, что задержка в выпрямителях моделируется в виде трех последовательных звеньев однотактовой задержки, поэтому каждый добавленный блок, моделирующий запаздывание в исполнительном устройстве по одному каналу, добавляет три состояния к обшему числу состояний дискретной системы.

Если система (3) управляемая [24-27], то обратная связь по состоянию, стабилизирующая систему, задается в виде  $u(n) = -K\hat{x}(n)$ , где  $\hat{x}$  — оценка вектора состояния х. Оценка состояния при наблюдаемости системы (3) получается с помощью наблюдателя состояния  $\hat{x}(n+1) = A\hat{x}(n) +$  $+ Bu(n) - L(\hat{y}(n) - y(n)), \ \hat{y}(n) = C\hat{x}(n),$  где  $\hat{y}$  — оценка вектора выходных сигналов y, а матрица обратной связи наблюдателя  $L \in \mathbb{R}^{91 \times 18}$  при невязке  $\hat{y}(n) - y(n)$  выбирается таким образом, чтобы полная матрица наблюдателя A-LC как замкну-

той системы была устойчива. Уравнения закона управления и оценки состояния можно свести к общей системе регулятора с наблюдателем в пространстве состояний

$$\hat{x}(n+1) = (A - LC - BK)\hat{x}(n) + Ly(n),$$

$$u(n) = -K\hat{x}(n).$$
(4)

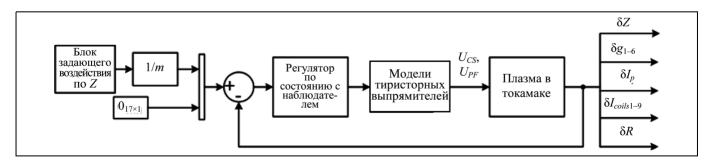
Полюса замкнутой системы размещаются в соответствии с минимизацией квадратичного критерия качества по матрице обратной связи K (решение линейно-квадратичной задачи оптимизации):

$$J = \sum_{n=0}^{\infty} [x^{T}(n)\lambda Qx(n) + U^{T}(n)(1-\lambda)Ru(n)] \xrightarrow{K} \min,$$
 (5)

гле матрицы  $O \ge 0$ , R > 0, а  $\lambda$  — настраиваемый параметр, позволяющий задать желаемое качество управления. Если решается линейно-квадратичная задача оптимизации для управляемой модели объекта (3), то матрица K дает заведомо устойчивую замкнутую систему [27].

В работе синтезирована стабилизирующая матрица обратной связи по состоянию  $K \in \mathbb{R}^{9 \times 91}$ для девяти входов модели объекта и 91-го состояния, минимизирующая критерий качества (5). Матрицы Q и R выбраны единичными, а параметр  $\lambda = 0.9$ . Полюса наблюдателя были заданы посредством матрицы  $L \in \mathbb{R}^{91 \times 18}$  в отрицательной обратной связи наблюдателя на отрезке действительной оси единичного круга [-0.05; +0.05]. Порядок полученного регулятора (4) при необходимости можно снизить, применяя методы редукции [22]. Структурная схема системы управления с регулятором по оценке состояния и наблюдателем показана на рис. 6.

Введение нормирующего коэффициента m, а далее и q, обусловлено тем, что метод управления по состоянию решает задачу стабилизации, а не слежения [24, 25, 27]. Для того, чтобы выходной



**Рис. 6. Структурная схема системы управления по оценке вектора состояния:**  $\delta Z$  — вертикальное смещение магнитной оси плазмы;  $\delta g_{1\text{-}6}$  — вариации зазоров между сепаратрисой плазмы и первой стенкой;  $\delta I_p$  — вариация тока плазмы;  $\delta I_{coils1\text{-}9}$  — токи в обмотках управления CS и PF,  $\delta R$  — горизонтальное смещение плазмы; 1/m — нормирующий коэффициент, где m — коэффициент усиления замкнутой системы на нулевой частоте



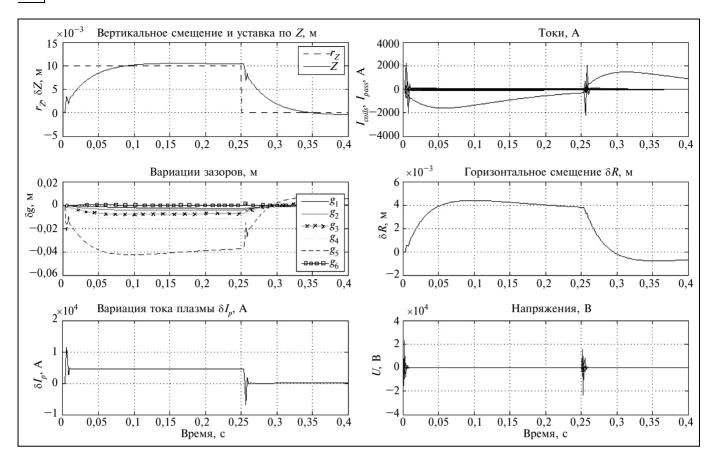


Рис. 7. Результаты моделирования системы с регулятором по оценке вектора состояния при подаче ступенчатой уставки по координате Z

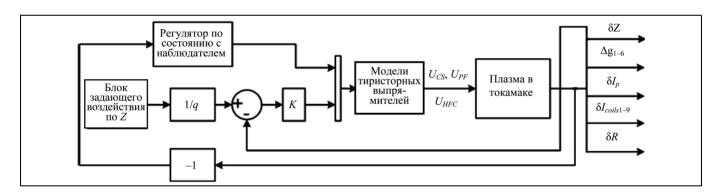


Рис. 8. Структурная схема системы управления с регулятором и наблюдателем по состоянию и дополнительным контуром стабилизации вертикального положения плазмы: K — пропорциональный регулятор с коэффициентом усиления 7500; 1/q — нормирующий коэффициент, где q — коэффициент усиления замкнутой системы от входа — напряжения на 10-й обмотке  $U_{HFC}$  — до вертикального смещения плазмы  $\delta Z$ 

сигнал системы был равен входному воздействию в установившемся режиме, необходимо вводить в прямой цепи нормирующий коэффициент, обратный коэффициенту усиления на нулевой частоте замкнутой системы управления.

Качество работы системы оценивалось по отработке уставки в 1 см по вертикальному положению плазмы Z. Результаты приведены на рис. 7. Система показала устойчивый переходный процесс по переменной Z со временем 0,1 с, несмотря на то, что 10-я обмотка (обмотка HFC) не участвует в процессе управления. Таким образом, можно сделать вывод, что стабилизировать вертикальное положение плазмы Z можно посредством управления по оценке состояния без дополнительного контура по вертикальному положению плазмы при



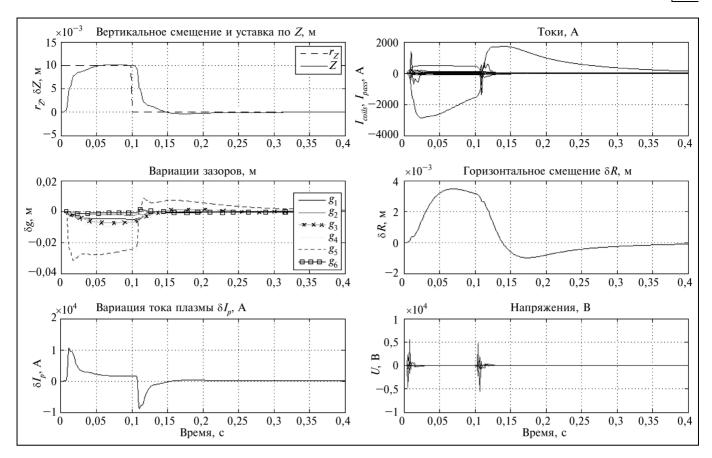


Рис. 9. Результаты моделирования системы с регулятором по оценке вектора состояния и дополнительным скалярным контуром стабилизации вертикального положения плазмы при подаче уставки по координате Z

наличии транспортного запаздывания в моделях выпрямителей в 3,3 мс.

# 5.2. Дополнительный контур стабилизации плазмы по вертикали

На рис. 8 приведена структурная схема системы управления с дополнительным контуром стабилизации Z по 10-й обмотке. Ко входу 10-й обмотки также подсоединена модель выпрямителя с транспортным запаздыванием в 3,3 с, а не модель ШИМ-элемента, т. е. инвертора напряжения.

Переходные процессы при подаче задающего воздействия в дополнительный скалярный контур по Z в 1 см показаны на рис. 9.

Применение пропорционального регулятора в контуре обратной связи с коэффициентом усиления, равным 7500, позволило сократить время переходного процесса до 0,05 сек. Таким образом, введение дополнительного контура по управлению вертикальным положением плазмы с обмоткой горизонтального поля HFC, питающейся от выпрямителя напряжения, позволяет оказывать влияние на качество переходных процессов при ста-

билизации вертикального положения плазмы и улучшать его.

#### **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

В статье рассмотрены две системы управления положением, формой и током плазмы в токамаке Т-15. Одна из них включает в себя многомерный контур развязки каналов управления, многомерный контур с  $H_{\infty}$ -регулятором и импульсный одномерный контур ШИМ-стабилизации положения плазмы по вертикали с пропорциональным регулятором. Эта система обеспечивает устойчивость плазмы в токамаке при подаче возмущения типа «малый срыв» и обладает хорошим быстродействием.

Во второй системе используется алгоритм размещения полюсов замкнутой системы. В ее состав входят наблюдатель для оценки вектора состояния и регулятор по оценке состояния. Показано, что с помощью данной системы можно стабилизировать вертикальное положение плазмы, не используя обмотку горизонтального магнитного поля НFC. Однако, введение дополнительного контура стаби-



лизации, использующего эту обмотку с многофазным выпрямителем, улучшает качество переходного процесса в системе.

Следующий шаг в разработке систем магнитного управления плазмой в токамаке Т-15 состоит в уточнении (идентификации) моделей исполнительных устройств и учете этих моделей при синтезе алгоритмов управления, а также в применении полученных регуляторов на плазмо-физическом коде DINA.

#### ЛИТЕРАТУРА

- Wesson J.A. Tokamaks. Oxford: Clarendon Press, 1997. 832 p.
- Кадомцев Б.Б., Шафранов В.Д. Магнитное удержание плазмы // Успехи физических наук. 1983. Т. 139, вып. 3. С. 399—434.
- 3. Azizov E. A., Belyakov V.A., Filatov O.G., Velikhov E.P., and T-15MD Team. Status of project of engineering-physical tokamak // 23rd International Atomic Energy Agency (IAEA) Fusion Energy Conf., Daejon, South Korea, 2010, FTP/P6-01.
- 4. *Лукаш В.Э., Докука В.Н., Хайрумдинов Р.Р.* Программно-вычислительный комплекс DINA в системе MATLAB для решения задач управления плазмой токамака // Вопросы атомной науки и техники. Сер.: Термоядерный синтез. 2004. № 4. С. 40—49.
- 5. Докука В.Н., Кадурин А.В., Митришкин Ю.В., Хайрутдинов Р.Р. Синтез и моделирование  $H_{\infty}$ -системы магнитного управления плазмой в токамаке-реакторе // Автоматика и телемеханика. 2007. № 8. С. 126—145.
- Митришкин Ю.В., Коростелев А.Я. Система с прогнозирующей моделью для управления формой и током плазмы в токамаке // Проблемы управления. 2008. № 5. С. 19—25.
- Mitrishkin Y.V., Korostelev A.Y., Sushin I.S., Khayrutdinov R.R., Dokuka V.N. Plasma Shape and Current Tracking Control System for Tokamak // Proceedings of The 13<sup>th</sup> IFAC Symposium on Information Control Problems in Manufacturing / V.A. Trapeznikov Institute of Control Sciences of the Russian Academy of Sciences. — Moscow, June 3—5, 2009. — Fr-C7.1. — P. 2133—2138.
- 9. *Митришкин Ю.В., Коростелев А.Я.* Каскадная система слежения за током и формой плазмы в токамаке с развязкой каналов управления // Вестник МГТУ. Сер.: Приборостроение. 2010. Т. 79, № 2. С. 21—38.
- 10. Митришкин Ю.В., Коростелев А.Я., Докука В.Н., Хайрутдинов Р.Р. Синтез и моделирование двухуровневой системы магнитного управления плазмой токамака-реактора // Физика плазмы. 2011. Т. 37, № 4. С. 307—349.
- 11. Mitrishkin Y.V., Kadurin A.V., Korostelev A.Y. Tokamak Plasma Shape and Current  $H_{\infty}$  Controller Design in Multivariable Cascade System // Proc.  $18^{th}$  IFAC World Congress. Milan, Italy, 2011.— TuA16.3. P. 3722—3727.
- Mitrishkin Y.V., Efremov A.A., Zenkov S.M., Sushin I.S., Doku-ka V.N., Khayrutdinov R.R. Hardware-in-the-loop Simulation as a stage of Plasma Control System Model-Based Design in Tokamaks: a Test Case // Proc. IEEE Multi-conference on Systems and Control. Denver, USA, 28 30 September, 2011. WeB03.6.
- 13. Кадурин А.В., Митришкин Ю.В. Многомерная система каскадного управления формой и током плазмы в токамаке

- со встроенным  $H_{\infty}$ -регулятором // Автоматика и телемеханика. 2011.  $\mathring{\mathbb{N}}$  10. С. 52—71.
- Mitrishkin Y.V., Kartsev N.M. Hierarchical Plasma Shape, Position, and Current Control System for ITER // Proc. the 50th IEEE Conference on Decision and Control and European Control Conference. Orlando, FL, USA, 12-15 December, 2011. TuA13.2. P. 2620—2625.
- 15. Mitrishkin Y.V., Efremov A.A., Zenkov S.M. Experimental Test Bed for Real Time Simulations of Tokamak Plasma Control Systems // Journal of Control Engineering and Technology, http://www.ijcet.org/ (in press).
- 16. Митришкин Ю.В., Зенков С.М. Каскадная система управления положением, формой и током плазмы в токамаке Т-15 // Материалы конф. «Управление в технических, эргатических, организационных и сетевых системах» (УТЭОСС-2012). СПб.: ГНЦ РФ ОАО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», 2012. С. 179—182.
- 17. Митришкин Ю.В., Зенков С.М., Карцев Н.М., Ефремов А.А. Сравнительный анализ систем управления неустойчивым вертикальным положением плазмы в токамаке // Тр. XII Международной конференции «Устойчивость и колебания нелинейных систем управления» / Институт проблем управления. М., 2012. С. 243—244.
- Mitrishkin Y.V., Zenckov S.M., Kartsev N.M., Efremov A.A., Dokuka V.N., Khayrutdinov R.R. Linear and impulse control systems for plasma unstable vertical position in elongated tokamak // Proc. The 51<sup>st</sup> IEEE Conference on Decision and Control. — Maui, Hawaii, USA, December 10—13, 2012. — P. 1697—1702.
- 19. Митришкин Ю.В., Карцев Н.С., Зенков С.М. Стабилизация неустойчивого вертикального положения плазмы в токамаке T-15 // Автоматика и телемеханика (в печати).
- 20. Бортников А.В., Герасимов С.Н., Митришкин Ю.В., Цыпакин И.А. Инвертор напряжения автоматической системы управления положением плазменного шнура в токамаке ТВД // Препринт ИАЭ 5068/7. М.: 1990. 36 с.
- 21. *Моин В.С.* Стабилизированные транзисторные преобразователи. М.: Энергоатомиздат, 1986. 376 с.
- Green M., Limebeer D.J.N. Linear Robust Control. Prentice Hall Inc.: A Paramount Communications Company / Englewood Cliffs, New Jersey 07632, 1995. — 538 p.
- 23. *McFarlane D., Glover K.* A Loop Shaping Design Procedure Using  $H_{\infty}$  Synthesis // IEEE Trans. Automatic Control. 1992. Vol. 37, N 6. P. 759—768.
- 24. Williams II R. L., Lawrence D. A. Linear state space control systems. Hoboken, N.J.: John Wiley & Sons, Inc. ISBN: 978-0-471-73555-7, 2007. 464 p.
- 25. Hespanha J.P. Linear systems theory. Princeton, N.J.: Princeton University Press. Princeton and Oxford, 2009. 263 p.
- 26. *Куо Б*. Теория и проектирование цифровых систем управления / Пер с англ. М.: Машиностроение, 1986. 448 с.
- Ogata K. Designing Linear Control Systems with MATLAB. Englewood Cliffs, N.J.: Prentice Hall, International, Inc., 1994. — 226 p.

Статья представлена к публикации членом редколлегии В.Ю. Рутковским.

Семен Михайлович Зенков — мл. науч. сотрудник, Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, г. Москва, **2** (495) 334-87-71, ⊠ szenckov@gmail.com,

**Юрий Владимирович Митришкин** — д-р техн. наук, гл. науч. сотрудник, Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, г. Москва, **☎** (495) 334-90-41, ⋈ yvm@mail.ru,

10