

## РАЗРАБОТКА И МОДЕЛИРОВАНИЕ РОБАСТНОЙ $H_{\infty}$ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ПОЛОЖЕНИЕМ ПЛАЗМЫ В ТОКАМАКЕ ГЛОБУС-М

Павлова Е.А.<sup>1</sup>

(Московский государственный университет  
им. М.В. Ломоносова, физический факультет)

*Рассмотрен вопрос разработки и моделирования магнитной системы управления вертикальным и горизонтальным положением плазмы в токамаке Глобус-М (ФТИ им. А.Ф. Иоффе, г. Санкт-Петербург) с  $H_{\infty}$ -регуляторами. Проанализирована методом математического моделирования система управления положением плазмы для линейной и полной модели нелинейного исполнительного устройства — инвертора тока в автоколебательном режиме.*

Ключевые слова: плазма, токамак, обратная связь,  $H_{\infty}$ -робастная система управления, инвертор тока.

### 1. Введение

Для обеспечения работоспособности токамака Глобус-М в течение плазменного разряда необходима системы управления для подавления вертикальной неустойчивости плазмы и стабилизации её горизонтального положения. Подавление вертикальной неустойчивости осуществляется с помощью катушек горизонтального поля – HFC (Horizontal Field Coil), а стабилизация горизонтального положения с помощью катушек вертикального поля – VFC (Vertical Field Coil). Ток в обмотках управления HFC и VFC регулируется с помощью системы стабилизации положе-

---

<sup>1</sup> Павлова Евгения Александровна, аспирантка физического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова (janerigoler@mail.ru).

ния плазмы с обратной связью, разработанной с помощью  $H_\infty$  - теории синтеза робастных регуляторов. Разработанные системы управления плазмой моделировались в программно-вычислительной среде MATLAB/Simulink.

## 2. Объект управления

Объектом управления в данной работе служит плазма в токамаке Глобус-М (рис.1) [3]. Глобус-М представляет собой сферический токамак, имеющий следующие основные параметры: большой радиус  $R=0,36$  м, малый радиус  $a=0,24$  м, aspect-ное отношение  $A=R/a=1,5$ , максимальный ток плазмы  $I_p=0,5$  МА.

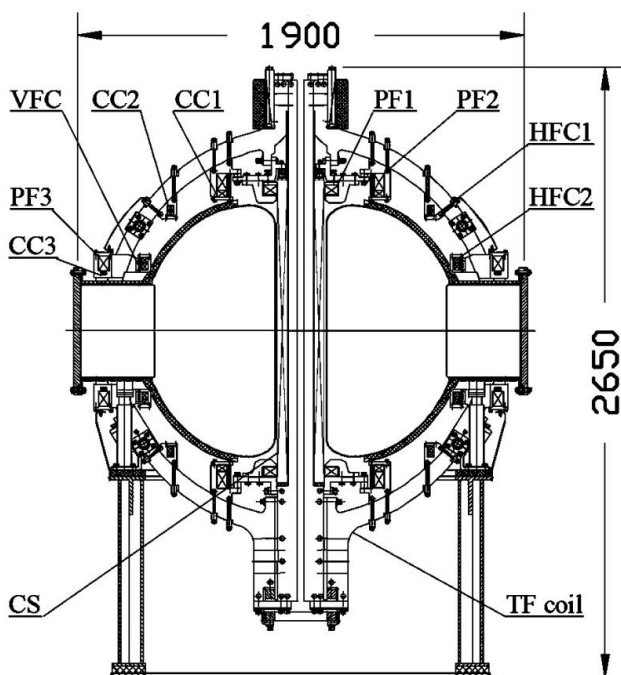


Рис. 1. Поперечное сечение токамака Глобус-М

Магнитная система полоидального поля в токамаке Глобус-М состоит из девяти пар обмоток. Все они могут быть разбиты

на три группы: катушки компенсации рассеянного поля центрального соленоида (CC), «медленные» (PF) обмотки полоидального магнитного поля, предназначенные для управления формой плазменного шнура, и «быстрые» (VFC, HFC) обмотки управления горизонтальным и вертикальным положением плазмы соответственно [3].

Для питания обмоток токамака используются шестифазные тиристорные выпрямители и быстрые инверторы тока с частотой до 3 кГц [1]. Исполнительные устройства в виде инверторов тока вместе с плазмой в токамаке и регуляторами охвачены обратной связью, что позволяет поддерживать заданное положение плазмы.

### **3. Магнитная диагностика положения плазмы**

Для измерения используемых при проектировании системы управления выходов объекта используется магнитная диагностика. Для решения задачи управления положением плазмы необходимо измерять вертикальное и горизонтальное смещение плазмы относительно заданных значений.

Вертикальное смещение плазменного шнура относительно положения магнитной оси в токамаке Глобус-М, определяется следующим образом [2]:

$$\Delta Z = \frac{A_\psi \cdot \Delta \psi + A_B \cdot \Delta B_r}{I_p},$$

где  $\Delta \psi$  – измеряемый магнитными петлями радиальный магнитный поток,  $\Delta B_r$  – разность значений радиального магнитного поля,  $A_\psi$  и  $A_B$  – размерные численные коэффициенты, определяемые с помощью реконструкции равновесия плазмы.

Горизонтальное положение – большой радиус геометрического центра последней замкнутой магнитной поверхности вычисляется так:

$$R = R_0 + \frac{\Delta \psi}{\partial \psi_2 / \partial R - \partial \psi_1 / \partial R},$$

где  $R_0$  – радиус центра вакуумной камеры,  $\Delta\psi$  – полоидальный магнитный поток, измеряемый седловидной петлей,  $\frac{\partial\psi}{\partial R} = -2\pi RB_V$  – градиент магнитного потока, измеряемый магнитными зондами [2].

#### 4. Линейная модель плазмы в токамаке

Линейная модель плазмы [5], пассивных и управляющих структур в токамаке Глобус-М имеет вид линейной стационарной системы уравнений в пространстве состояний:

$$\dot{x} = Ax + Bu, \quad y = Cx + Du,$$

где  $A_{75 \times 75}$ ,  $B_{75 \times 8}$ ,  $C_{48 \times 75}$ ,  $D=0_{48 \times 8}$  – матрицы модели. Вектор выходных сигналов:

$$y = [\delta Z \quad \delta R \quad \delta I_p \quad \delta I_{HFC} \quad \delta I_{VFC} \quad \delta I_{CS} \quad \delta I_{PF} \quad \delta I_{CC} \quad \delta g \quad \delta F]^T,$$

где  $\delta Z$ ,  $\delta R$  – смещения плазмы по горизонтали и по вертикали,  $\delta I_p$  – приращение тока плазмы,  $\delta I_{HFC}$ ,  $\delta I_{VFC}$ ,  $\delta I_{CS}$ ,  $\delta I_{PF}$ ,  $\delta I_{CC}$  – приращения токов в HFC, VFC, CS, PF, CC соответственно,  $\delta g$  – смещения шести зазоров между сепаратрисой и первой стенкой,  $\delta F$  – приращения потоков на петлях и в десяти точках. Вектор входных воздействий:  $u = [\delta U_{HFC} \quad \delta U_{VFC} \quad \delta U_{CS} \quad \delta U_{PF} \quad \delta U_{CC}]^T$ , где  $\delta U_{HFC}$ ,  $\delta U_{VFC}$ ,  $\delta U_{CS}$ ,  $\delta U_{PF}$ ,  $\delta U_{CC}$  – приращения напряжений в HFC, VFC, CS, PF, CC соответственно.

Компоненты вектора состояния  $x$  представляют собой приращения токов в пассивных структурах и активных обмотках.

#### 5. Структура системы управления

Для решения задачи стабилизации положения плазмы в токамаке Глобус-М была синтезирована двухконтурная система управления вертикальным  $Z$  и горизонтальным  $R$  положением плазмы (рис.2).

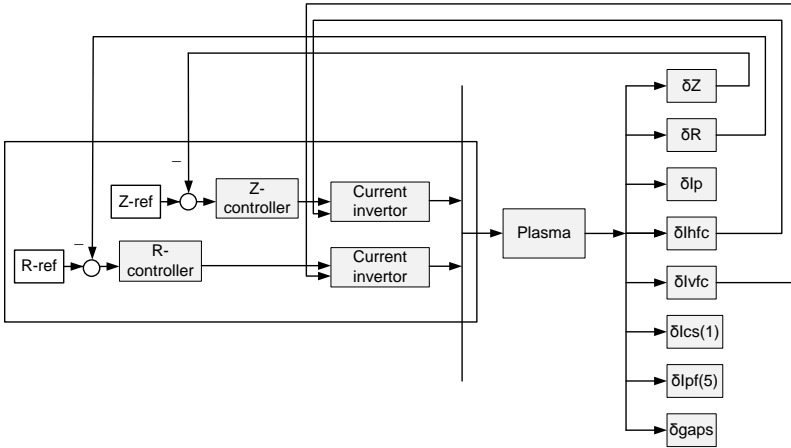


Рис. 2. Структурная схема двухконтурной системы управления положением плазмы в токамаке Глобус-М

При синтезе регуляторов применялся метод  $H_\infty$ -теории оптимизации [4]. Данный метод основан на взаимно-простой факторизации передаточной функции модели объекта  $G = M^{-1}N$ . Для синтеза оптимального регулятора необходимо определить весовые функции  $W_1$ ,  $W_2$ , позволяющие обеспечить устойчивость замкнутой системы управления. При синтезе регуляторов были достигнуты следующие запасы робастной устойчивости:

- регулятор  $K_{180}$ , для модели в момент разряда 180 мс: регулятор по  $Z$  (порядок регулятора 3)  $\varepsilon_{Z1} = 0,197$ ; регулятор по  $R$  (порядок регулятора 3)  $\varepsilon_{R1} = 0,243$ ;
- регулятор  $K_{190}$ , для модели в момент разряда 190 мс: регулятор по  $Z$  (порядок регулятора 5)  $\varepsilon_{Z2} = 0,226$ ; регулятор по  $R$  (порядок регулятора 3)  $\varepsilon_{R2} = 0,243$ .

Здесь  $\|\Delta_N \Delta_M\|_\infty < \varepsilon$  является  $H_\infty$ -нормой пары неопределенных устойчивых передаточных функций  $\Delta_N$ ,  $\Delta_M$  в сомно-

жителях факторизации возмущенной модели объекта

$$G_{\Delta} = (M + \Delta_M)^{-1} (N + \Delta_N) \quad [4].$$

Синтез регулятора осуществлялся для линеаризованной модели плазмы в точке выбранного разряда, соответствующей 180 мс и 190 мс. Поскольку  $H_{\infty}$ -теория оптимизации позволяет синтезировать регуляторы с большим запасом робастной устойчивости, в точке 180 мс был синтезирован регулятор, который сохраняет свою работоспособность в точке 190 мс, аналогично в точке 190 мс был синтезирован регулятор, который сохраняет свою работоспособность в точке 180 мс.

## 6. Результаты численного эксперимента

При численном эксперименте на вход модели системы подавались задающие воздействия для горизонтального и вертикального смещения плазмы  $Z_{ref} = 5$  мм,  $R_{ref} = 5$  мм. Было проведено моделирование работы системы с линейной и полной нелинейной моделью инвертора тока. Результаты моделирования позволяют сделать вывод о хорошем соответствии процессов управления с линейной и полной моделями выпрямителя (рис. 3-б). Также результаты численного моделирования свидетельствуют о высокой степени робастности регуляторов синтезированных в точках сценария соответствующих 180 и 190 мс. После возмущения сигналы вертикального и горизонтального смещения сошлись к соответствующим задающим воздействиям с практически равной нулю статистической ошибкой. Это стало возможным благодаря тому, что синтезированный  $H_{\infty}$ -регулятор имеет астатизм первого порядка. Время переходного процесса при стабилизации вертикального положения составило 1 мс, при стабилизации горизонтального положения – 5 мкс. При этом максимальное отклонение вертикального и горизонтального положения плазмы составило 5 см и 4 мм соответственно. Максимальный ток в обмотке горизонтального поля составил 150 А, максимальное управляющее напряжение – 630 В. Максимальный ток в обмотке вертикального поля составил 450 А, максимальное управляющее напряжение – 1150 В.

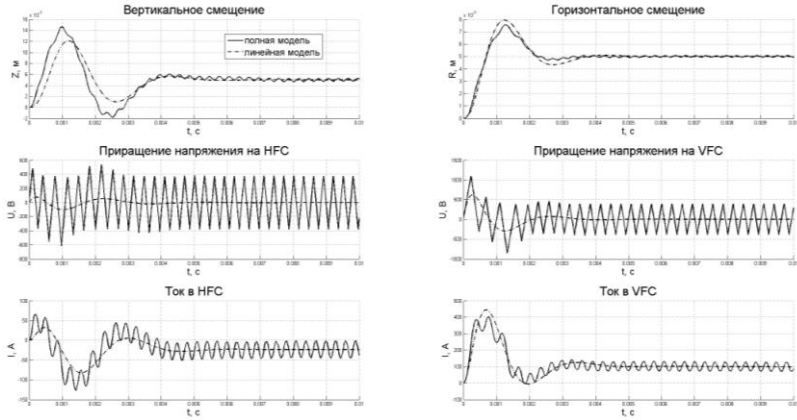


Рис. 3. Переходные процессы в системе с неустойчивым полюсом  $795 \text{ с}^{-1}$ . Момент разряда 180 мс. Регулятор  $K_{180}$ .

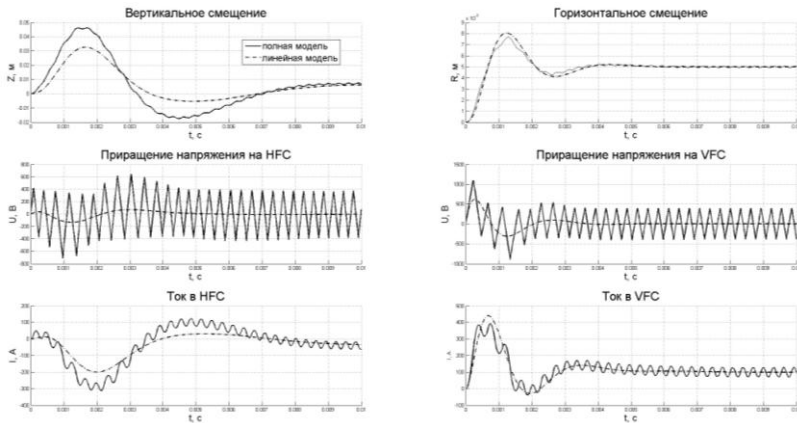


Рис. 4. Переходные процессы в системе с неустойчивым полюсом  $1828 \text{ с}^{-1}$ . Момент разряда 190 мс. Регулятор  $K_{180}$ .

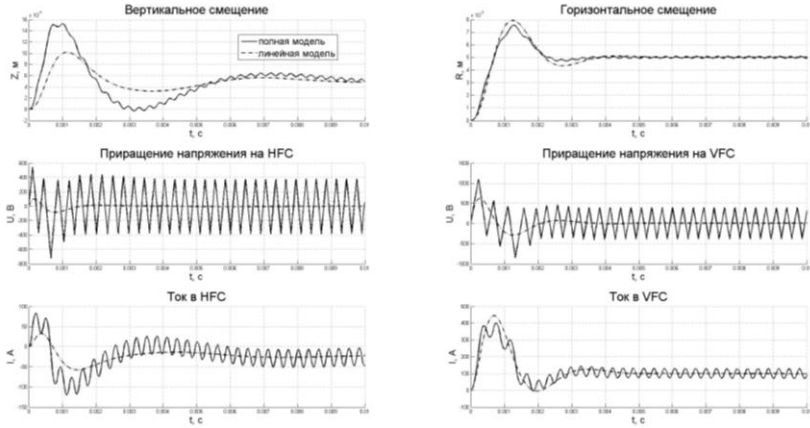


Рис. 5. Переходные процессы в системе с неустойчивым полюсом  $795 \text{ с}^{-1}$ . Момент разряда 180 мс. Регулятор  $K_{190}$ .

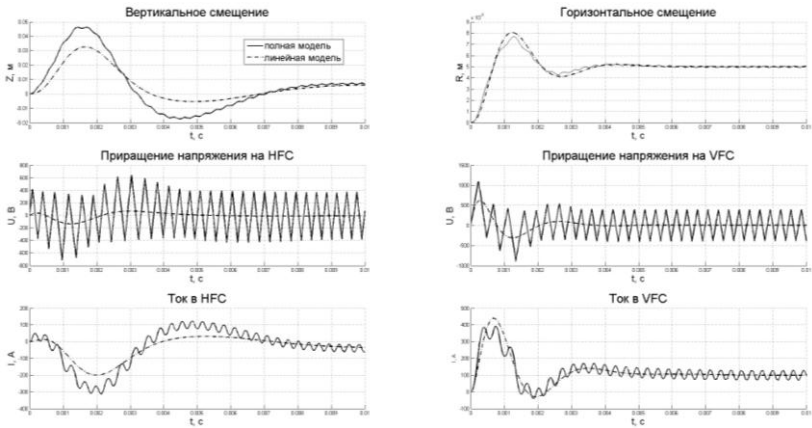


Рис. 6. Переходные процессы в системе с неустойчивым полюсом  $1828 \text{ с}^{-1}$ . Момент разряда 190 мс. Регулятор  $K_{190}$ .

## 7. Заключение

Синтезирована двухконтурная робастная система управления положением плазмы в токаке Глобус-М. Применение  $H_\infty$ -теории оптимизации позволило получить регуляторы с боль-



шим запасом робастной устойчивости, что было показано при численном моделировании.

### **Литература**

1. КУЗНЕЦОВ Е.А., МИТРИШКИН Ю.В. *Автоколебательная система стабилизации неустойчивого вертикального положения плазмы токамака «Глобус-М»* // Научное издание. ИПУ РАН. – М., 2005. – 72 с.
2. ЛЕВИН Р.Г. *Реконструкция магнитогидродинамического равновесия плазмы на сферическом токамаке Глобус-М* // дис. канд. техн. наук. – Санкт-Петербург, 2007. – 163 с.
3. GUSEV V. K., AZIZOV E. A., ALEKSEEV A. B., ET AL. *Globus-M results as the basis for a compact spherical tokamak with enhanced parameters Globus-M2* // *Nuclear Fusion*. – 2013. – Vol. 53, 093013. – 14 p.
4. MCFARLANE D.C., GLOVER K. *A loop shaping design procedure using  $H_\infty$  synthesis* // *IEEE Transactions of Automatic Control*. – 1992. – Vol. 37, № 6. – P. 759–769.
5. MITRISHKIN Y.V., KORENEV P.S., KARTSEV N.M., PATROV M.I. *Plasma shape control with a linear model for Globus-M tokamak*. // 41st Conference on Plasma Physics. – Berlin, Germany, June 23-27, 2014. – Accepted for presentation and publication.

### **ARTICLE TITLE, DESIGN AND MODELING OF $H_\infty$ CONTROL SYSTEM IN GLOBUS-M TOKAMAK**

**Evgeniia Pavlova**, M.V. Lomonosov Moscow State University, Faculty of Physics, Moscow, post-graduate student (janerigoler@mail.ru).

*Abstract: The paper is devoted to design and modeling of vertical and horizontal plasma position  $H_\infty$  magnetic control system in a Globus-M tokamak (Ioffe Physical-Technical Institute, St. Petersburg). Control system of plasma for linear and full model of nonlin-*

*ear actuator – current inverter in a free-running operation, was analyzed.*

Keywords: plasma, tokamak, feedback,  $H_\infty$ -robust control system, current inverter.