

## ИДЕНТИФИКАЦИЯ И МНОГОКОНТУРНОЕ УПРАВЛЕНИЕ ПОЛОЖЕНИЕМ, ТОКОМ И ФОРМОЙ ПЛАЗМЫ В ТОКАМАКЕ ГЛОБУС-М

Е.А. Павлова, Ю.В. Митришкин (Москва)

### Введение

В настоящее время для исследования сложных в техническом и физическом смысле динамических систем широко применяются математические модели, полученные с помощью различных методов. Поэтому для исследования плазменного разряда и построения систем управления в токамаках, в частности в токамаке Глобус-М, необходимо построение моделей, которые с высокой степенью адекватности соответствуют физическому эксперименту. Данные модели позволяют имитировать эксперимент, в ходе которого можно настраивать регуляторы, управляющие плазмой, на этих моделях, не нанося вреда дорогостоящему оборудованию. В дальнейшем, после того как система управления будет настроена на модели объекта управления, можно перенести её на реальную установку и с высокой долей вероятности ожидать, что система будет работоспособной. Для успешной реализации подобного подхода, необходима высокая степень достоверности имитационных моделей. Первая часть доклада посвящена вопросам получения моделей, обладающих высокой степенью точности, и описан поход, позволяющий добиться хорошего совпадения между моделированием и реальным экспериментом. Вторая часть доклада посвящена разработке систем управления положением, формой и током плазмы в токамаке Глобус-М. При этом настройка регуляторов проводится для имитационных моделей, и затем полученные регуляторы переносятся на исходную модель, и проверяется их работоспособность.

### Линейная модель плазмы в токамаке Глобус-М

Объектом данного исследования служит плазма в токамаке Глобус-М [1]. Глобус-М – это сферический токамак, имеющий следующие характерные параметры: большой радиус  $R=0,36$  м, малый радиус  $a=0,24$  м, аспектное отношение  $A=R/a=1,5$ , максимальный ток плазмы  $I_p=0,5$  МА.

Линейная модель плазмы [2], 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  $A_{75 \times 75}$ ,  $B_{75 \times 8}$ ,  $C_{39 \times 75}$ ,  $D=0_{39 \times 8}$  – 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 катушках соответственно,  $\delta g$  – смещения шести зазоров между сепаратрисой и первой стенкой,  $\delta F$  – приращения потоков на петлях и в специальном образом выбранных 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 катушках соответственно.

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

Выходные данные, полученные с описанной выше модели высокого (75) порядка, будут использованы в качестве результатов имитации реального физического эксперимента. В качестве модели идентификации будем использовать модель низкого порядка, которая будет определена ниже по исходной модели высокого порядка.

### Идентификация линейных моделей

Для разработки системы управления плазмой удобно иметь модель невысокой размерности, которая достаточно точно описывает динамику плазмы в течение квазистационарной фазы плазменного разряда. Применение таких моделей, например, позволяет специалистам синтезировать регуляторы обратной связи. Для токамака Глобус-М идентификация осуществлялась на основе данных численного эксперимента, проведенного для модели 75 порядка.

Перед началом численного эксперимента неустойчивая линейная модель была стабилизирована по вертикальному положению с помощью автоматически настроенного в Simulink ПИД-регулятора в заранее выбранной точке сценария. Затем на вход полученной замкнутой системы управления подавались тестовые задающие воздействия. Тестовые сигналы подавались последовательно на 4 контура управления: (1) вертикальным и (2) горизонтальным положением, (3) током плазмы, (4) зазорами между сепаратрисой и первой стенкой. Поскольку численный эксперимент проводился в одной точке сценария, то первая половина (по времени) плазменного разряда была использована для идентификации, а вторая половина для верификации полученных моделей.

Идентификация проводилась с помощью System Identification Toolbox Matlab 2014b. В результате идентификации контура (1) была получена передаточная функция замкнутой системы. Зная параметры регулятора вертикального положения была восстановлена передаточная функция разомкнутой системы. При идентификации контуров (2)-(4) в объект управления также были включены регуляторы ранее настроенных контуров управления. Точность идентификации контуров управления вертикальным (2 порядка) и горизонтальным (3 порядка) положением составляет 89 и 94 % соответственно, током плазмы (9 порядка) – 86% и многомерной идентификации контура управления формой плазмы (20 порядка) по каждому каналу ~80-90%. На рис. 1, 2 представлены результаты сравнения переходных процессов для системы с полной моделью 75 порядка и моделью полученной с помощью идентификации. Видно, что по средней составляющей процессы совпадают.

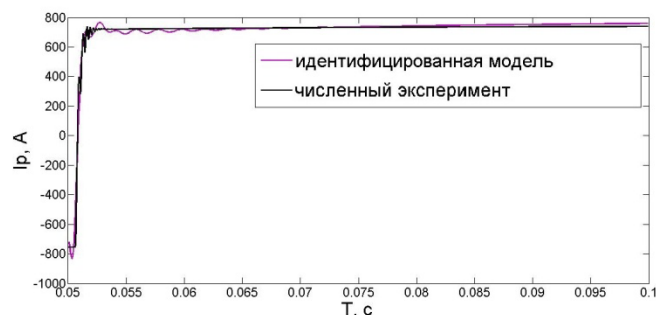


Рис. 1. Сравнение идентифицированной и экспериментальной моделей для контура управления током плазмы.

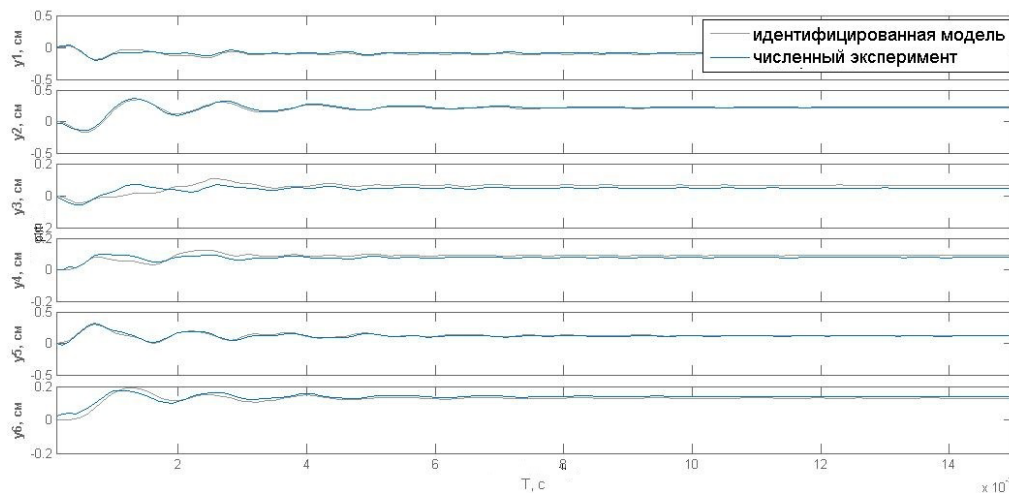


Рис. 2. Сравнение идентифицированных и экспериментальных моделей для контура управления зазорами между сепаратрисой и первой стенкой.

### Структура системы управления, многоконтурное управление

Для управления плазмой в токамаке Глобус-М была синтезирована четырехконтурная система управления (Рис. 3).

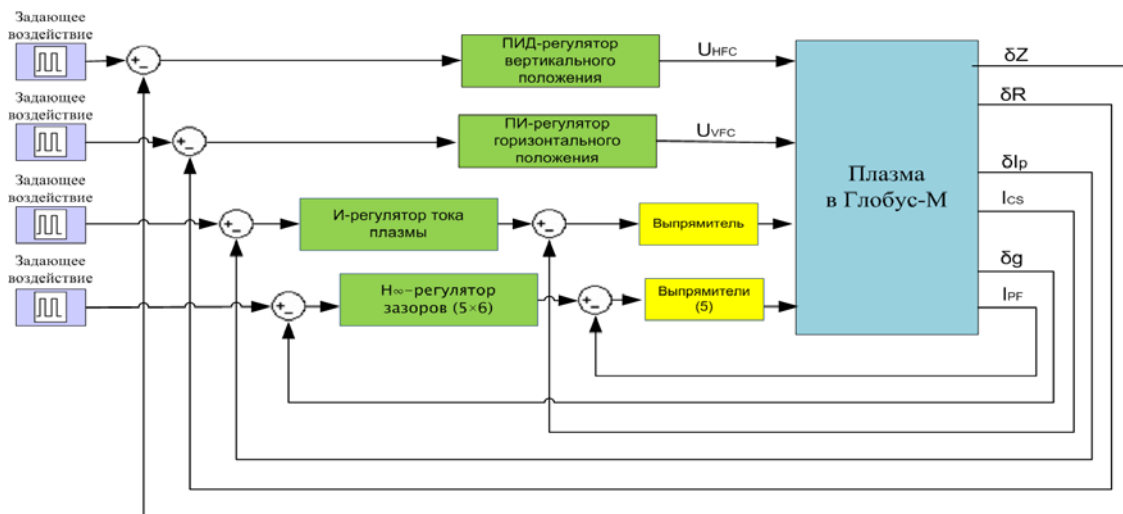


Рис.3. Блок-схема системы управления.

Синтез системы управления осуществлялся для идентифицированных моделей, что позволило аналитически определить коэффициенты параметров ПИД-регуляторов, обеспечивающих нужное качество переходных процессов. После настройки регуляторов весь блок управления в неизменном виде был перенесен на систему с полной моделью плазмы. Преимуществом данного подхода является то, что в дальнейшем он может быть применен на действующем токамаке Глобус-М для получения моделей и последующего синтеза регуляторов по реальным экспериментальным данным.

Для синтеза регуляторов управления положением и током плазмы применялся метод автоматической настройки ПИД-регуляторов  $PID = K_p + \frac{K_i}{s} + \frac{K_d s}{T_f s + 1}$ :

- ПИД-регулятор вертикального положения:  $K_p = 84.9919$ ,  $K_i = 8507.5$ ,  $K_d = 0.1301$ ,  $T_f = 1/29981.5$ ;
- ПИ-регулятор горизонтального положения:  $K_p = 544.8643$ ,  $K_i = 25716$ ,  $K_d = 0$ ,  $T_f = 1/2740.06$ ;
- И-регулятор тока плазмы:  $K_p = 0$ ,  $K_i = 131.79$ ,  $K_d = 0$ ,  $T_f = 0$ .

При синтезе многомерного регулятора  $K$  (представляющего собой передаточную матрицу размерности  $5 \times 6$ ) управления формой плазмы применялся метод  $H_\infty$ -оптимизации [3], основанный на взаимно-простой факторизации передаточной функции модели объекта  $G = M^{-1}N$ . При этом запас робастной устойчивости полученного регулятора  $\varepsilon = 0.36$ . Здесь  $\|\Delta_N \Delta_M\|_\infty < \varepsilon$  является  $H_\infty$ -нормой пары неопределенных устойчивых передаточных функций  $\Delta_N$ ,  $\Delta_M$  в сомножителях факторизации возмущенной модели объекта  $G_\Delta = (M + \Delta_M)^{-1}(N + \Delta_N)$ .

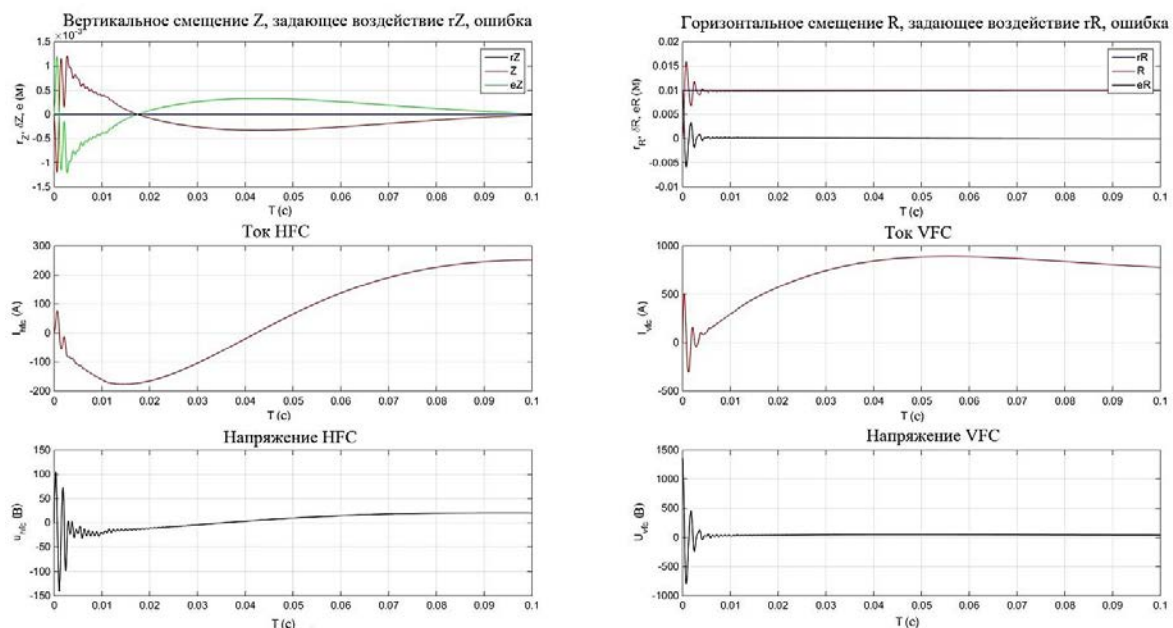


Рис. 4. Работа контуров стабилизации вертикального и горизонтального положения плазмы

Результаты численного моделирования представлены на Рис. 5, 6. Для тестирования системы на её вход подавались следующие задающие воздействия: 0 м по вертикальному положению, 0.01 м по горизонтальному положению, 5 кА по току плазмы и  $0.01 \times [1 \ 1 \ -1 \ -1 \ 0 \ 1]$  м по зазорам. Переходные процессы в рассматриваемом случае заканчиваются через 0.01 с.

Для тестирования возможностей синтезированной системы управления, в объект управления были введены задержки ввода и вывода для объекта и регулятора. При

отработке аналогичных задающих воздействий была показана высокая точность совпадения с системой без задержек.

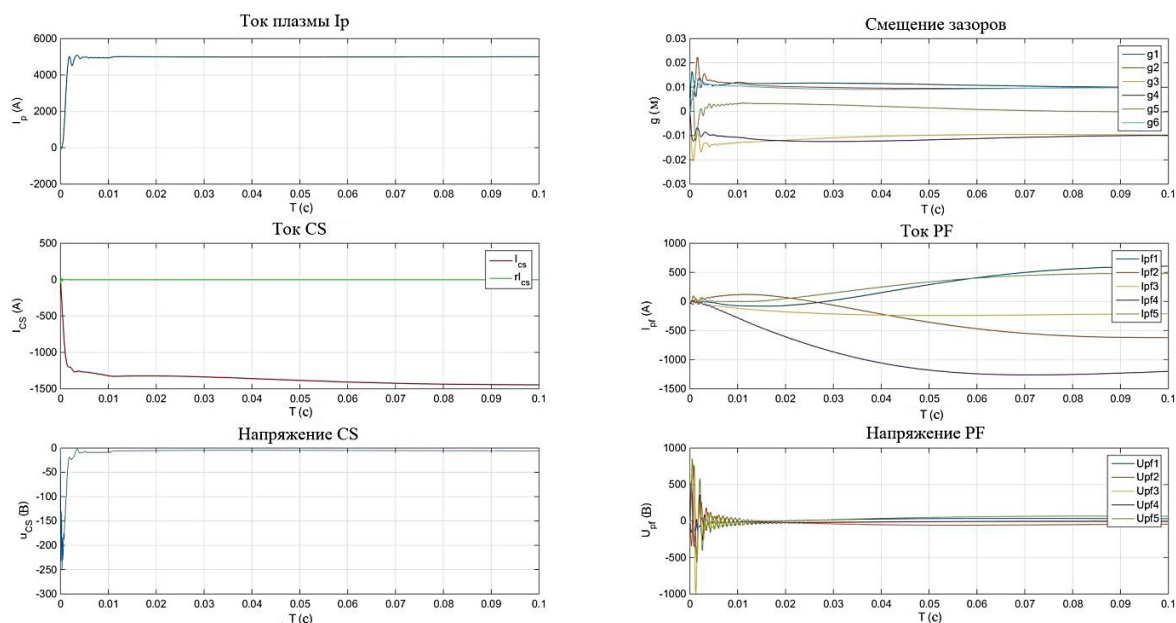


Рис. 5. Работа контуров стабилизации тока и формы плазмы.

### Выводы

Разработаны и промоделированы каскадные системы управления положением, током и формой плазмы для токамака Глобус-М. Для контуров управления положением и током плазмы применялись ПИД-регуляторы, а для многомерного контура использовался робастный синтез на основе  $H_\infty$  оптимизации. Отработан подход идентификации каскадов управления током плазмы и зазорами с дальнейшим синтезом регуляторов и применением их на исходной модели. Предлагаемый метод позволяет в значительной степени упростить и ускорить процедуру синтеза регуляторов, а также проводить синтез регуляторов в реальных физических экспериментах. Дальнейшее развитие предложенных методов будет основано на применении идентификации непосредственно к экспериментальным данным токамака Глобус-М.

### 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. Mitrishkin Yu.V., Korenev P.S., Kartsev N.M., Patrov M.I., Plasma shape control with a linear model for Globus-M tokamak, 41st EPS Conference on Plasma Physics, Berlin, Germany, 2014.
3. 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.