

## НАСТРОЙКА СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ПОЛОЖЕНИЕМ ПЛАЗМЫ И ПОЛОИДАЛЬНЫМИ ТОКАМИ ТОКАМАКА ГЛОБУС-М2 И РЕАЛИЗАЦИЯ НА СТЕНДЕ РЕАЛЬНОГО ВРЕМЕНИ

Кружков В. И.<sup>1</sup>

(ФГБУН Институт проблем управления  
им. В. А. Трапезникова РАН, Москва, Физический  
факультет МГУ им. М. В. Ломоносова, Москва)

Для реализации цифровой системы магнитного управления плазмой в сферическом токамаке Глобус-М2 (ФТИ им. А.Ф. Иоффе, г. Санкт-Петербург) был разработан стенд реального времени, реализованный с помощью двух промышленных компьютеров Spreadgoat Performance с операционной системой Simulink RT (ИПУ РАН им. В. А. Трапезникова, Москва), <https://www.ipu.ru/press-center/62866>. Такой подход позволяет создать цифровой двойник систем управления плазмой с обратной связью для проведения моделирования физического эксперимента в реальном времени. В данной работе представлена настройка восьми робастных ПИД-регуляторов управления вертикальным и горизонтальным положением плазмы и токами в катушках полоидального поля. Для настройки использован метод количественной теории обратной связи (QFT – Quantitative Feedback Theory), основанный на анализе диаграммы Николса разомкнутой системы, с последующим переводом ее в дискретное время с временем дискретизации 100 мкс. Дискретное время необходимо для реализации на компьютере SpreadGoat Performance. Полученная система была реализована на стенде реального времени и протестирована на массиве линейных моделей плазмы с различными параметрами. Система управления показала устойчивость к изменениям модели плазмы и запаздыванию в каналах управления.

Ключевые слова: ПИД-регулятор, плазма, токамак, моделирование в реальном времени.

### 1. Введение

В 2021-м году в ИПУ РАН им. В.А. Трапезникова был создан стенд реального времени для моделирования систем магнитного управления плазмой в токамаках в реальном времени (рис. 1) [4]. На стенде используются два компьютера Spreadgoat

---

<sup>1</sup> Валерий Игоревич Кружков, м.н.с. ([kruzhkov.vi14@physics.msu.ru](mailto:kruzhkov.vi14@physics.msu.ru)).

Performance, позволяющих проводить моделирование в реальном времени, соединенных обратной связью. Такой подход позволяет моделировать системы управления плазмой в токамаках в реальном времени, после чего компьютер-регулятор может быть установлен на реальный объект.

Набор линейных моделей плазмы с постоянными параметрами в пространстве состояний получен из уравнений Кирхгофа для катушек управления, вакуумной камеры и законов Ньютона для движения плазмы для различных моментов диверторной фазы нескольких плазменных разрядов [1]. Другим подходом для построения моделей плазмы может быть идентификация [3].

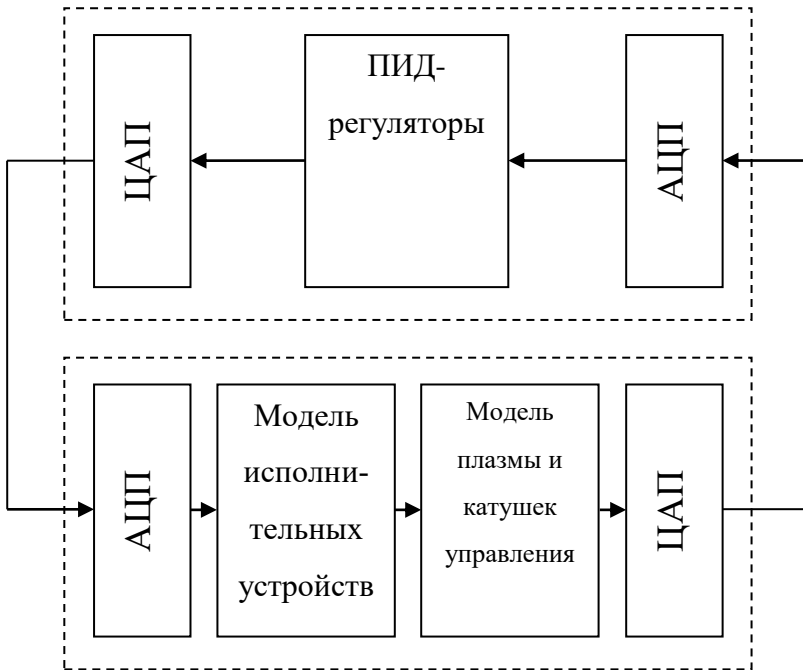


Рис. 1. Структурная схема цифровой замкнутой системы управления плазмой, реализуемой на стенде реального времени

## 2. Настройка ПИД-регуляторов

Для настройки регуляторов использована количественная теория обратной связи (QFT – Quantitative Feedback Theory) [2]. Этот метод позволяет настраивать робастные регуляторы для массива линейных объектов. Для системы управления токамаком важно использовать робастные регуляторы, поскольку параметры плазмы меняются от разряда к разряду и в течение самого разряда. Также система управления должна быть устойчивой к запаздыванию, поскольку в дальнейшем в замкнутую систему управления будет встроен алгоритм оценки формы плазмы по управляющим сигналам и внешним измерениям, что приводит к ограничению на период дискретизации 100 мкс.

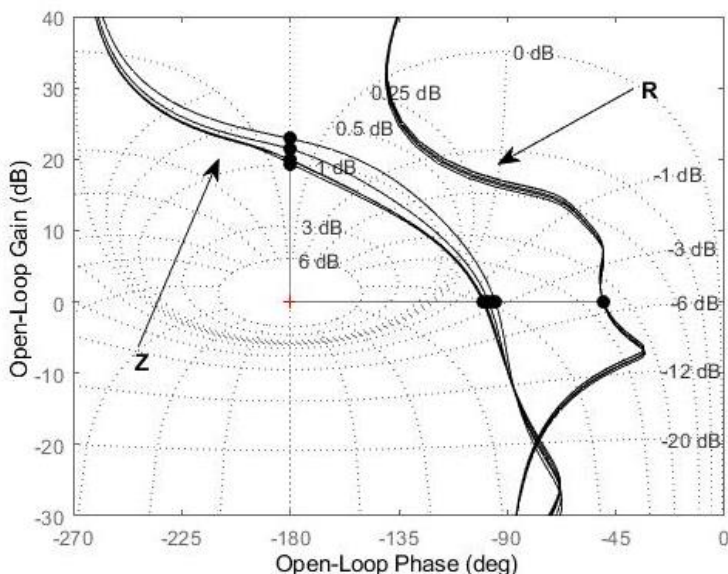


Рис. 2. Диаграмма Николса разомкнутых систем управления вертикальным (Z) и горизонтальным (R) положениями плазмы с моделями, соответствующими 160-й, 170-й, 180-й, 190-й и 200-й мс плазменного разряда токамака Глобус-М2 в непрерывном времени

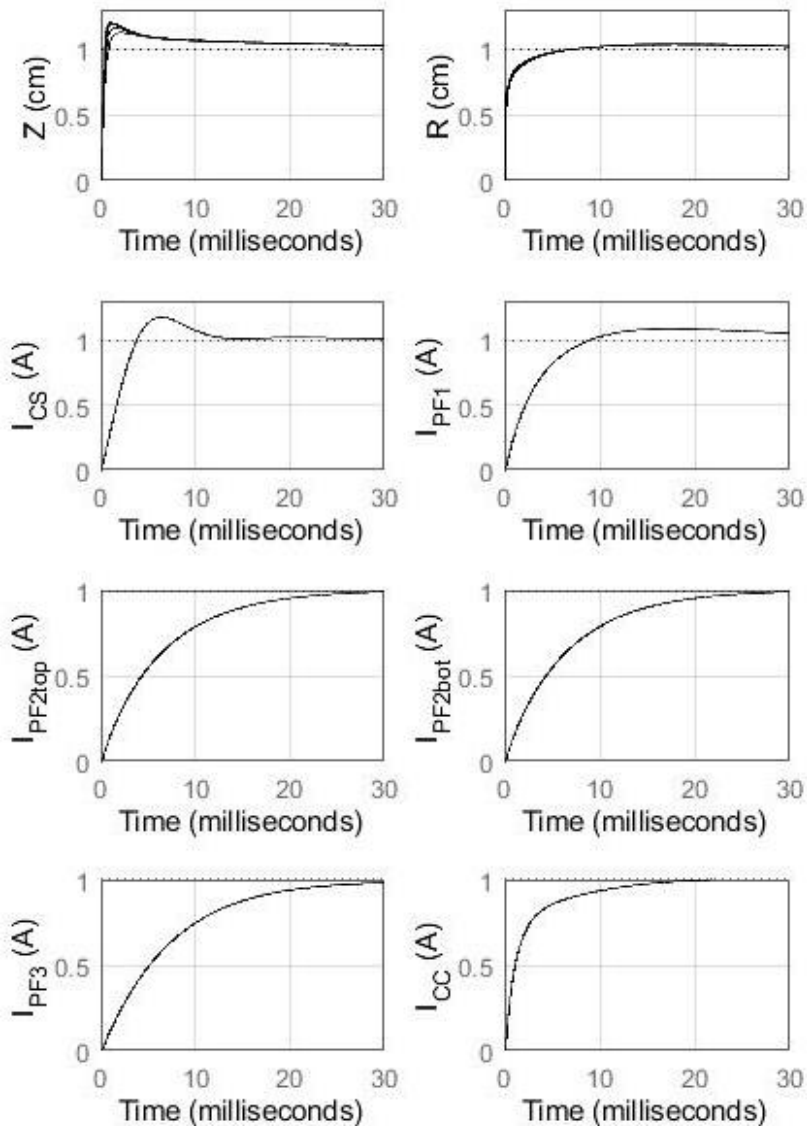
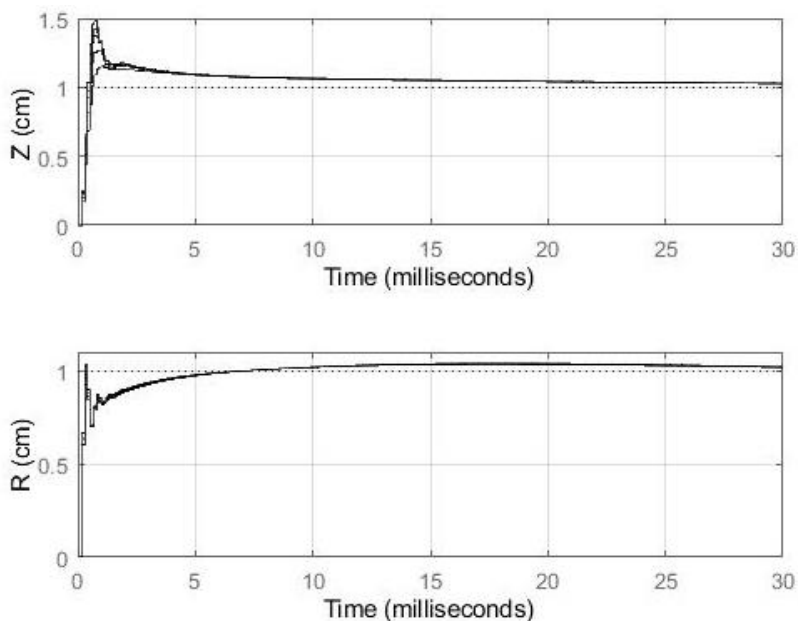


Рис. 3. Переходные функции замкнутой системы управления положением плазмы и полоидальными токами с различными моделями плазмы

Идея метода количественной теории обратной связи в анализе диаграммы Николса разомкнутой системы. На диаграмме Николса частота является параметром, по оси абсцисс располагается фаза, а по оси ординат – амплитуда системы. Расстояние от точки  $(-180^{\circ}, 0 \text{ дБ})$  по оси абсцисс является запасом устойчивости по фазе, по оси ординат – запасом устойчивости по амплитуде. Рассматривая набор диаграмм Николса разомкнутых систем с различными моделями плазмы, параметры регулятора выбираются так, чтобы обеспечить устойчивость системы с любой из моделей и повысить запасы устойчивости (рис. 2). Настройка регуляторов производилась с применением QFT Control Toolbox [2].



*Рис. 4. Переходные функции замкнутой системы управления вертикальным и горизонтальными положениями с различными моделями плазмы и запаздыванием на один такт*

Таким образом, были настроены регуляторы вертикального и горизонтального положения плазмы (рис. 2) и регуляторы токов в катушках полоидального поля, в центральном соленоиде и корректирующей обмотке в непрерывном времени. После перехода в дискретное время с шагом дискретизации 100 мкс с помощью метода согласованного  $Z$ -преобразования регуляторы были реализованы на машине реального времени. Полученная система была протестирована на моделях плазмы, соответствующих различным моментам диверторной фазы плазменного разряда (рис. 3), а также с запаздыванием в обратной связи на один и два такта. Добавление в обратную связь звена запаздывания сильнее всего влияет на контуры управления положением плазмы, увеличивая перерегулирование и колебательность; время переходного процесса остается около 30–50 мс (рис. 4).

### **3. Заключение**

Синтезирована цифровая система управления положением плазмы и токами в катушках полоидального поля. Система протестирована на стенде реального времени с различными моделями плазмы. ПИД-регуляторы обрабатывают уставку, демонстрируют время переходного процесса менее 50 мс, перерегулирование – менее 25% (рис. 3), показывая устойчивость к запаздыванию (рис. 4). Запасы устойчивости по амплитуде более 6,5 дБ, по фазе – более 50°. Разработанные ПИД-регуляторы могут в дальнейшем быть использованы в качестве части каскадной системы управления формой плазмы.

Работа поддержана грантом РФФ № 21-79-20180.

### **Литература**

1. КОРЕНЕВ П.С., МИТРИШКИН Ю.В., ПАТРОВ М.И. *Реконструкция равновесного распределения параметров плазмы токамака по внешним магнитным измерениям и построение линейных плазменных моделей // Мехатроника, автоматизация, управление.* – 2016. – Т. 17 – С. 254–265

2. GARCIA-SANZ M., *Robust control engineering. Practical QFT solutions.* – Taylor & Francis Group, 2017.
3. MITRISHKIN Y.V., KARTSEV N.M., PROKHOROV A.A. et al. *Tokamak plasma models development for plasma magnetic control systems design by first principle equations and identification approach* // Procedia computer science. – 2021 – Vol. 186. – P. 466 – 474.
4. MITRISHKIN Y.V. *Plasma magnetic control systems in D-shaped tokamaks and imitation digital computer platform in real time for controlling plasma current and shape* // Advances in Systems Science and Applications. In press.

## **SYNTHESIS OF CONTROL SYSTEM FOR PLASMA POSITION AND POLOIDAL CURRENTS CONTROL FOR GLOBUS-M2 TOKAMAK AND REALISATION OF IT ON REAL-TIME MODELING COMPUTERS**

**Valerii Kruzhkov**, V.A. Trapeznikov Institute of Control Sciences of RAS, Moscow, M.V. Lomonosov Moscow State University, Moscow (kruzhkov.vi14@physics.msu.ru).

*Abstract: Real-time simulation complex with two industrial Speedgoat Performance computers under SimulinkRT operational system was developed (Institute of Control Science of RAS, Moscow, Russia) <https://www.ipu.ru/press-center/62866> for realization of the digital plasma control system of the Globus-M2 spherical tokamak (Ioffe Institute, Saint-Petersburg, Russia). Such approach allows making a digital twin of the tokamak control system, paired by feedback for real-time simulation of physical experiments on the tokamak. This work deals with tuning of 8 robust PID-controllers for vertical and horizontal plasma position and currents in poloidal field coils. For PID-controllers tuning QFT (Quantitative Feedback Theory) approach was used with continuous to discrete transform with sample time of 100 mcs. QFT is based on the Nichols plot analysis of the open-loop system. Discrete time is necessary for realization on Speedgoat Performance computer. The obtained control system was realized on real-time computers and on the array of linear plasma models with different parameters. The control system is stable and robust.*

Keywords: PID-controller, plasma, tokamak, real-time simulation.

УДК 533.9  
ББК 22.333