

ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ ПЛАЗМОЙ В ТОКАМАКЕ СО СТЕНДОМ РЕАЛЬНОГО ВРЕМЕНИ

Митришкин Юрий Владимирович^{1,2,3}, Джумакаев Тимур Казбекович^{2,3},
Коренев Павел Сергеевич^{1,3}

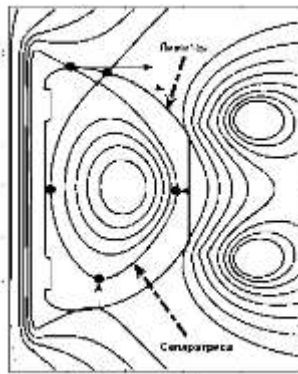
¹Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Физический факультет, Москва

²Московский физико-технический институт (государственный университет), Долгопрудный, Московская область

³Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, Москва

1. Постановка задачи

Целью работы является разработка и имитационное моделирование системы магнитного управления плазмой в токамаке Глобус-М (ФТИ им. А.Ф. Иоффе, г. Санкт-Петербург) для встраивания в имитатор стенда реального времени. Токамак – это тороидальная камера для удержания высокотемпературной плазмы в магнитном поле, создаваемым внешними катушками с током.



а



б

Рис.1. Магнитная конфигурация плазмы (а) и стенд реального времени (б).

Для линейной модели плазмы, разработанной в [1], необходимо создать систему управления плазмой по току и форме. Под формой плазмы понимается форма ее сепаратрисы, которая задается тремя расстояниями от сепаратрисы до стенки камеры токамака в трех заданных точках и положением точек пресечения сепаратрисы с вакуумной камерой (рис. 1а). Сепаратриса – это наибольшая замкнутая линия уровня полоидального магнитного потока. Регуляторы по горизонтальному и вертикальному положению плазмы являются аналоговыми и работают в физическом эксперименте на токамаке Глобус-М [1]. В данной работе синтезируются регуляторы по току и форме плазмы в дискретном времени.

2. Линейные модели плазмы в токамаке

Для построения системы управления необходимо представить плазму в виде линейной модели в пространстве состояний. Динамика плазмы в токамаке описывается уравнениями Кирхгофа для магнитно взаимосвязанных контуров катушек токамака и витка плазменного тока [1]:

$$M \delta \dot{I} + M_p \delta \dot{I}_p + R \delta I + \frac{\partial \Psi}{\partial \vec{r}_p} \delta \dot{\vec{r}}_p = \delta U, M_p^T \delta \dot{I} + M_{pp} \delta \dot{I}_p + \frac{\partial \Psi_{pc}}{\partial \vec{r}_p} \delta \dot{\vec{r}}_p = 0, \quad (1)$$

$$M = \begin{bmatrix} M_{cc} & M_{cv} \\ M_{vc} & M_{vv} \end{bmatrix}, R = \begin{bmatrix} R_c & 0 \\ 0 & R_v \end{bmatrix}, U = \begin{bmatrix} U_c \\ 0_{N_v \times 1} \end{bmatrix},$$

$$\frac{\partial \Psi}{\partial \vec{r}_p} = \begin{bmatrix} \partial \Psi_{cp} / \partial r_p & \partial \Psi_{cp} / \partial z_p \\ \partial \Psi_{vp} / \partial r_p & \partial \Psi_{vp} / \partial z_p \end{bmatrix}, \vec{r}_p = \begin{bmatrix} r_p \\ z_p \end{bmatrix}, M_p = \begin{bmatrix} M_{pc} \\ M_{pv} \end{bmatrix}, \frac{\partial \Psi_{pc}}{\partial \vec{r}_p} = \begin{bmatrix} \partial \Psi_{pc} / \partial r_p \\ \partial \Psi_{pc} / \partial z_p \end{bmatrix}^T,$$

где M – блочная матрица индуктивностей, R – диагональные матрицы сопротивлений, Ψ – матрицы создаваемых контурами магнитных потоков, U – напряжения на катушках полоидального поля, индексы c, v, p обозначают катушки, вакуумную камеру токамака и плазму соответственно.

При выводе линейной модели массой плазмы пренебрегают. Равнодействующая сил, действующих на плазму, должна быть равна нулю:

$$F_p \delta \vec{r}_p + F_I \delta I = 0, F_p = \begin{bmatrix} \partial F_r / \partial r_p & \partial F_r / \partial z_p \\ \partial F_z / \partial r_p & \partial F_z / \partial z_p \end{bmatrix}, F_I = \begin{bmatrix} \partial F_r / \partial I_c & \partial F_r / \partial I_v \\ \partial F_z / \partial I_c & \partial F_z / \partial I_v \end{bmatrix}. \quad (2)$$

Подставив (2) в (1), получаем линейную модель

$$\delta \dot{I} = A \delta I + B U, y = C \delta I, A = -\tilde{M}^{-1} R, B = \tilde{M}^{-1} \begin{bmatrix} 1_{N_c \times N_c} & 0_{N_c \times N_v} \end{bmatrix}^T. \quad (3)$$

Выходные сигналы модели (3) представляются в виде следующих выражений:

$$\delta I_p = -M_{pp}^{-1} \left(M_p^T - \frac{\partial \Psi_{pc}}{\partial \vec{r}_p} F_r^{-1} F_I \right) \delta I, \delta \vec{r}_p = -F_r^{-1} F_I \delta I, \delta g = \frac{\partial g}{\partial I} \delta I.$$

3. Концепция стенда реального времени

Экспериментальный стенд – установка, использующая промышленные компьютеры для отработки систем управления в реальном времени, которая [2]:

- ✓ позволяет обрабатывать и настраивать системы управления в реальном времени на модели объекта управления;
- ✓ позволяет устранить все ошибки в системе управления реального времени до переключения регулятора на объект;
- ✓ гарантирует работоспособность системы управления на реальном объекте при условии достаточной степени адекватности модели объекту;
- ✓ существенно сокращает время настройки замкнутой системы управления;
- ✓ позволяет организовать дистанционное управление путём переноса алгоритмов управления на аналогичный стенд или регулятор на объекте.

Стенд, используемый для моделирования систем управления в данной работе, состоит из автоматизированного рабочего места (АРМ) для оператора, двух промышленных компьютеров, аналого-цифровых преобразователей (АЦП) на их входах и цифро-аналоговых преобразователей (ЦАП) на их выходах (рис. 1б). На первом компьютере воспроизводится работа регулятора в среде реального времени Simulink RT (Real Time), на втором – модель объекта также в Simulink RT. При этом возможно переключение между моделью объекта и реальным объектом посредством программного ключа. Работа системы управления моделируется на имитаторе стенда с целью отработки принципов управления в реальном времени для применения на натуральном стенде.

4. Системы компьютерной математики MATLAB и LabVIEW

Для разработки и исследования систем управления плазмой применялись две системы компьютерной математики: MATLAB (MathWorks) и LabVIEW (National Instruments).

MATLAB (Matrix Laboratory) – это высокоуровневый язык и интерактивная среда для программирования, численных расчётов и визуализации результатов (начало разработки – конец 70-х годов). MATLAB представляет собой основу всего семейства продуктов MathWorks (80 пакетов прикладных программ) и является главным

инструментом для решения широкого спектра научных и прикладных задач, в таких областях как: моделирование объектов и разработка систем управления, проектирование коммуникационных систем, обработка сигналов и изображений, измерение сигналов и тестирование, финансовое моделирование, вычислительная биология и др. Важным для практической работы в MATLAB является графическая среда моделирования Simulink. Хотя все ее возможности можно реализовать в скриптах и функциях, она является эффективным средством для разработки систем управления, поскольку представляет системы в виде структурных схем, удобных и понятных для инженеров. В данной работе все схемы в MATLAB реализованы посредством Simulink.

LabVIEW (Laboratory Virtual Instrumentation Engineering Workbench) – это среда разработки и платформа для выполнения программ, созданных на графическом языке программирования «G». Первая версия LabVIEW была выпущена в 1986 году для Apple Macintosh, в настоящее время существуют версии для UNIX, Linux, Mac OS и пр., а наиболее развитыми и популярными являются версии для Microsoft Windows. LabVIEW используется в системах сбора и обработки данных, а также для управления техническими объектами и технологическими процессами. Идеологически LabVIEW очень близка к SCADA-системам (Supervisory Control And Data Acquisition), но в отличие от них в большей степени ориентирована на решение задач не столько в области АСУ ТП, сколько в области автоматизированных систем научных исследований.

Далее проводится сравнение этих двух сред разработки посредством моделирования в них одной и той же системы управления.

5. Система управления плазмой в токамаке Глобус-М

Синтез многомерного регулятора для системы управления формой плазмы в токамаке Глобус-М был осуществлён в MATLAB посредством решения задачи смешанной чувствительности [3]. Для этого регулятор отыскивался на множестве стабилизирующих регуляторов в обратной связи при минимизации H_∞ -нормы составной блочной матрицы

$$\left\| \begin{matrix} W_1(s)S(s) \\ W_2(s)K(s)S(s) \end{matrix} \right\|_{\infty} \xrightarrow{K(s)} \min ,$$

где $K(s)$ – матричная передаточная функция регулятора, $S(s) = [I + G(s)K(s)]^{-1}$ – выходная передаточная функция чувствительности, связывающая выходное возмущение d и выход объекта y в области изображений по Лапласу $y(s) = S(s)d(s)$, $I + G(s)K(s)$ – выходная возвратная разность, $G(s)$ – передаточная функция модели объекта, $-K(s)S(s)$ – передаточная функция от внешнего возмущения d ко входу объекта $u(s) = -K(s)S(s)d(s)$ при отрицательной обратной связи, $W_1(s), W_2(s)$ – весовые функции. В процессе синтеза регулятора весовые функции настраивались так, чтобы достигнуть приемлемого компромисса между качеством управления и запасом робастной устойчивости, который в данном случае определяется H_∞ -нормой матричной передаточной функции аддитивной неопределённости модели объекта Δ_A :

$$\|\Delta_A(s)\|_{\infty} \leq \frac{1}{\|K(s)S(s)\|_{\infty}}, \quad \|\Delta_A(s)\|_{\infty} = \sup_{\omega} \bar{\sigma}[\Delta_A(j\omega)], \quad \bar{\sigma}(\Delta_A) = \max_i \left(+\sqrt{\lambda_i(\Delta_A \Delta_A^H)} \right).$$

Система управления в MATLAB разделена на два блока – регулятор и модель (рис. 2),

что просто и элегантно представляет концепцию стенда из двух компьютеров (рис. 1б).

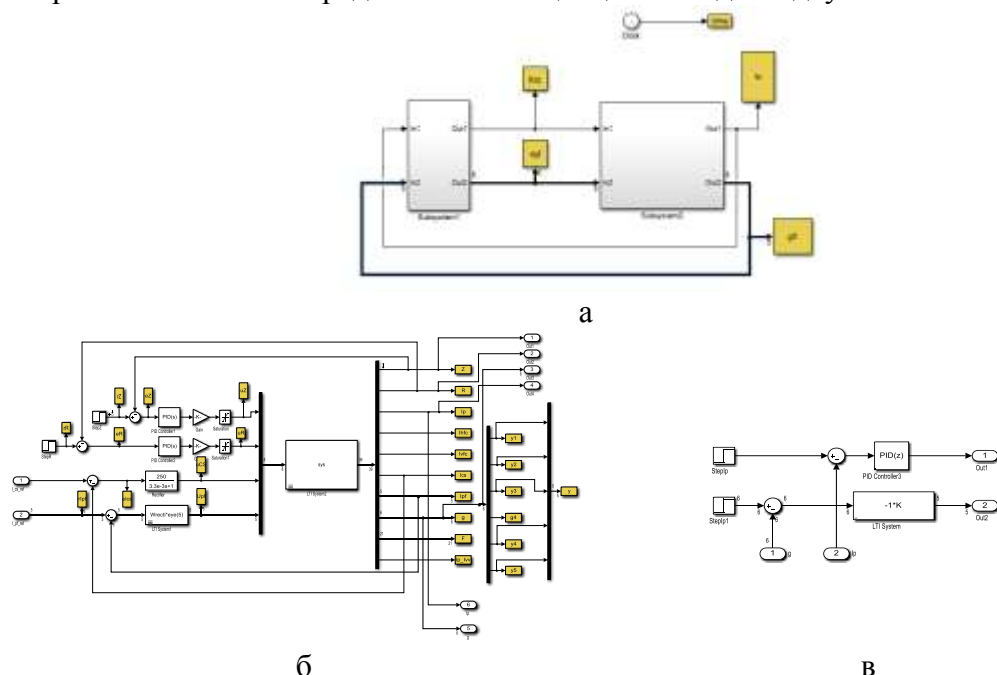


Рис. 2. Система управления в MATLAB (а), блок «Модель» (б) и блок «Регулятор» (в).

На вход системы управления формой плазмы скачком подавались задающие воздействия по зазорам (Gaps), которые система обрабатывает, примерно, за 30 мс (рис. 3). При этом в токе плазмы (Plasma Current) образуется переходный процесс, сходящийся к нулевому значению его отклонения от заданной величины за такой же интервал времени. Токи в центральном соленоиде (CS Current) и обмотках полоидального поля (PF currents) сходятся к постоянным значениям также за 30 мс. Реальное время моделирования в MATLAB составило 1,965 с.

Была промоделирована система управления с добавленными блоками транспортного запаздывания. Эти блоки имитировали работу АЦП и ЦАП согласно концепции стенда (рис. 1б). Запаздывание для АЦП задавалось равным 5 мкс, для ЦАП – 10 мкс. Введение этих блоков не привели к существенному изменению результатов работы системы.

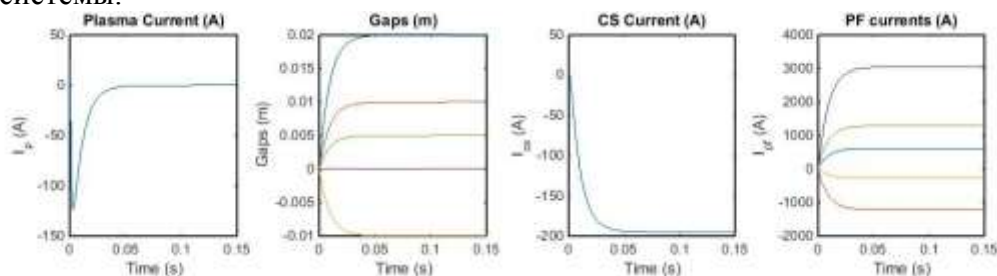


Рис. 3. Результаты моделирования системы управления плазмой в MATLAB.

Система управления в среде LabVIEW аналогична системе в MATLAB (рис. 4). Здесь также присутствует разбиение на два блока – регулятор и модель. Результаты работы системы по току и форме плазмы здесь не приводятся из-за их идентичности с результатами в MATLAB. Схема в LabVIEW получается весьма громоздкой и запутанной (рис. 4) по сравнению с той же схемой в Simulink (рис. 2). Эта дополнительная сложность в LabVIEW возникает из-за того, что все схемы систем в LabVIEW набираются из блоков виртуальных приборов, имеющих фиксированную структуру. Такой подход, заложенный в самом начале в среду LabVIEW, создаёт

неудобство и непрозрачность при исследовании систем управления и их настройке. Исследуемая система была промоделирована в LabVIEW за 14,415 с реального времени, что на порядок (!) медленнее аналогичного показателя в MATLAB.

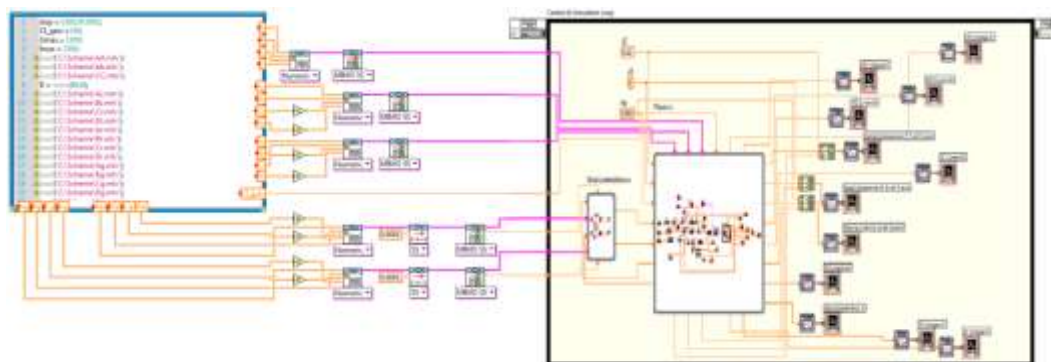


Рис. 4. Имитация стенда в среде LabVIEW.

6. Сравнение систем управления в средах разработки LabVIEW и MATLAB

По результатам имитационного моделирования системы управления плазмой в двух средах компьютерной математики было выяснено, что MATLAB по сравнению с LabVIEW имеет ряд существенных преимуществ:

- наличие значительно большего объема методов синтеза и анализа систем управления (80 Toolboxes);
- на порядок более высокое время быстродействия при моделировании систем управления;
- заметно более компактное и удобное представление схем многомерных систем;
- возможность моделирования в скриптах и в Simulink при их взаимодействии, что повышает гибкость и универсальность среды разработки систем управления;
- возможность работы из командной строки;
- позволяет на порядок сократить время решения типовых задач и значительно упрощает разработку новых эффективных алгоритмов управления и идентификации.

Выводы

Разработка и имитационное моделирование системы управления положением, током и формой плазмы в токамаке Глобус-М в средах MATLAB и LabVIEW в имитаторе стенда реального времени показали ряд преимуществ MATLAB/Simulink. На основании этого предлагается создание стенда реального времени на промышленных компьютерах компании Speedgoat (www.speedgoat.ch), операционной системой в которых является Simulink в реальном времени (Simulink RT) от компании MathWorks.

Литература

1. 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.
2. 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. Vol. 3, Iss. 3, July 2013, pp. 121-130, American V-King Scientific Publish.
3. Skogestad S., Postlethwaite I. Multivariable feedback control. Analysis and design // John Wiley & Sons, 2001.