

УДК 681.51:621.3.002.5:621.039.6:533.95

УПРАВЛЕНИЕ УДАРНЫМИ ТОЧКАМИ В КОНФИГУРАЦИИ ТОКАМАКА ГЛОБУС-М2 С ДВУМЯ Х-ТОЧКАМИ

Ю.В. Митришкин

*Физический факультет МГУ им. М.В. Ломоносова
Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН
Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, Дом 1, строение 2
Россия, 117997, Москва, Профсоюзная ул., 65
E-mail: mitrishkin.yv19@physics.msu.ru*

Е.А. Павлова

*Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН
Россия, 117997, Москва, Профсоюзная ул., 65
E-mail: pavlova@physics.msu.ru*

П.С. Коренев

*Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН
Россия, 117997, Москва, Профсоюзная ул., 65
E-mail: pkorenev@ipu.ru*

В.И. Кружков

*Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН
Россия, 117997, Москва, Профсоюзная ул., 65
E-mail: kruzhhkov@ipu.ru*

Ключевые слова: токамак, Глобус-М2, ТИН, ПИД-регулятор, H_∞ -оптимизация, QFT, неустойчивое вертикальное положение плазмы.

Аннотация: Для оригинального проекта токамака ТИН рассматривается конфигурация плазмы с двумя Х-точками. Для моделирования аналогичной конфигурации был рассчитан сценарий плазменного разряда в сферическом токамаке Глобус-М2 с двумя Х-точками. Для данного разряда была построена линейная модель плазмы и синтезирована каскадная система управления ударными точками при помощи двух подходов: H_∞ -теории оптимизации и количественной теории обратной связи (Quantitative Feedback Theory – QFT). Введено свипирование ударных точек.

1. Введение

В настоящее время разрабатывается проект Термоядерного Источника Нейтронов (ТИН, НИЦ «Курчатовский Институт») на основе токамака.

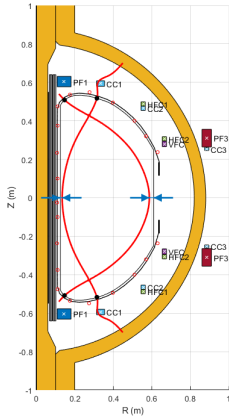


Рис. 1. Сечение токамака Глобус-М2

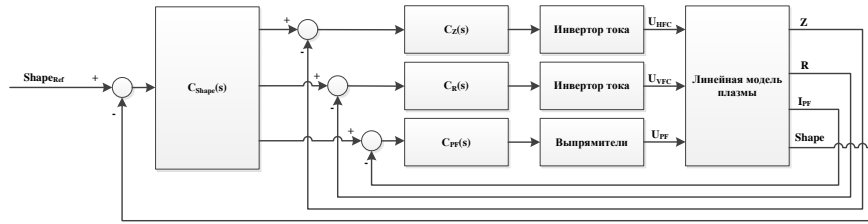


Рис. 2. Структурная схема каскадной системы управления формой плазмы

Реализация такого проекта позволит многократно увеличить сырьевую базу ядерных электростанций: термоядерные нейтроны, облучая уран-238, плутоний-239 или торий позволяют получить уран-233, а также могут быть использованы для трансмутации минорных актинидов отработавшего ядерного топлива [1].

X-точка – это точка на сепаратрисе, в которой полоидальная компонента поля обращается в ноль. Каждой из X-точек соответствует две ударные точки – пересечения сепаратрисы с первой стенкой токамака (рис. 1). Продукты реакции а также примеси, образующиеся в результате эрозии элементов первой стенки, выводятся из области удержания плазмы вдоль сепаратрисы и оказывают существенное тепловое воздействие на материалы диверторных пластин в окрестности ударных точек, что снижает срок их эксплуатации. Одним из способов уменьшения давления примесей является т.н. свипирование ударных точек, т.е. колебания ударных точек вдоль диверторных пластин, за счет чего увеличивается площадь воздействия примесей. Такое колебание может осуществляется посредством магнитного управления плазмой.

Для имитации магнитного управления ударными точками в ТИН была рассмотрена модель плазмы в сферическом токамаке Глобус-М2 (ФТИ им. А.Ф. Иоффе) [2]. Модель линеаризована возле равновесия с двумя X-точками:

$$(1) \quad \dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t), \quad y(t) = Cx(t) + Du(t),$$

где $A \in \mathbb{R}^{18 \times 18}$ (матрица A имеет одно неустойчивое собственное значение), $B \in \mathbb{R}^{18 \times 10}$, $C \in \mathbb{R}^{38 \times 18}$, $D \in \mathbb{R}^{38 \times 10}$. Входы – напряжения на обмотках полоидального поля, выходы – положение плазмы, ток плазмы и токи в обмотках полоидального поля, смещения ударных точек и изменения расстояний между супаратрисой и первой стенкой вакуумной камеры.

1.1. Каскадная система управления

В работе рассмотрена каскадная многоконтурная система управления плазмой (рис. 2). Внутренний каскад управляет вертикальным и горизонтальным положением плазмы при помощи регуляторов $C_Z(s)$, $C_R(s)$, а также токами в обмотках полоидального поля. В качестве модели инвертора тока используется

пропорциональное звено с коэффициентом усиления 250, модель выпрямителя – инерциальное звено первого порядка с передаточной функцией: $W_{rect}(s) = \frac{1}{T_{rect}s+1}$, где $T_{rect} = 3,3$ мс. Внешний каскад формирует задающее воздействие посредством регулятора $C_{shape}(s)$ по положению и токам таким образом, чтобы получить желаемую форму плазмы.

1.2. Синтез ПИД-регуляторов методом H_∞ -теории

Синтез регулятора для контура управления 4-мя ударными точками осуществлен методом H_∞ -оптимизации, основанным на взаимно-простой факторизации передаточной функции модели объекта $G = M^{-1}N$ [3].

Запас робастной устойчивости регулятора $\epsilon = 0,33$. Здесь $\|\Delta_N \Delta_M\|_\infty < \epsilon$ является H_∞ -нормой пары неопределенных устойчивых передаточных функций Δ_N , Δ_M в сомножителях факторизации возмущенной модели объекта $G_\Delta = (M + \Delta_M)^{-1}(N + \Delta_N)$. Под запасом робастной устойчивости понимается величина H_∞ -нормы максимальной неопределенности в модели объекта, при которой замкнутая система еще сохраняет устойчивость.

Для обеспечения возможности применения полученного регулятора в реальном физическом эксперименте была произведена дискретизация с периодом $T_s = 100$ мкс. Полученный дискретный регулятор применен в замкнутой системе управления с непрерывной нестационарной моделью плазмы (гибридная система). Работа системы управления приведена на рис. 3.

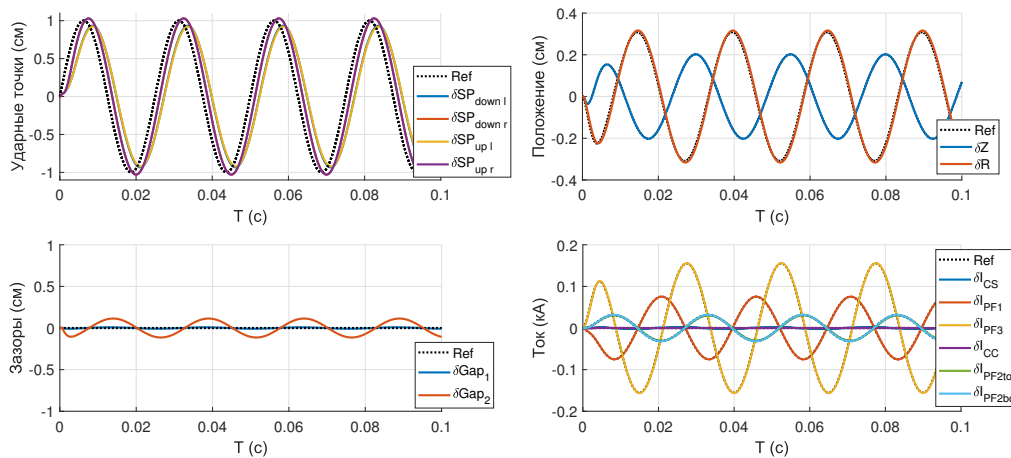


Рис. 3. Реакция гибридной системы управления на задающее воздействие по 4-м ударным точкам в виде синусоиды с частотой 40 Гц и амплитудой 1 см

1.3. Синтез ПИД-регуляторов методом QFT

Метод количественной теории обратной связи [4] основан на анализе диаграммы Николса разомкнутой системы управления. Диаграмма Николса является объединением АЧХ и ФЧХ, ось абсцисс – сдвиг по фазе, ось ординат – коэффициент усиления. Мнимальное расстояние от точки $(-180^\circ, 0$ дБ) до пересечения с диаграммой по оси абсцисс – запас по фазе, по оси абсцисс – запас по амплитуде (рис. 4).

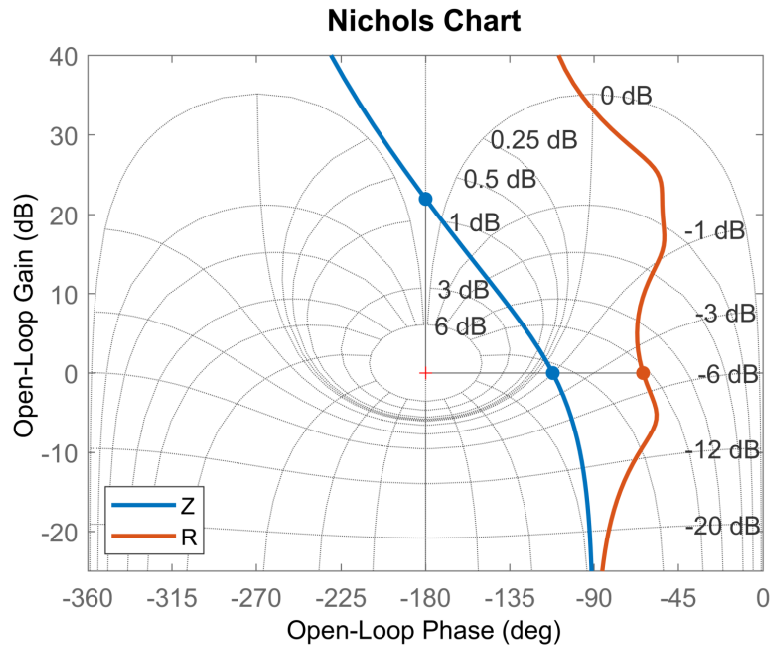


Рис. 4. Диаграмма Николса разомкнутых систем управления по вертикали (Z) и горизонтали (R)

Во-первых, с помощью метода QFT были синтезированы ПИД-регуляторы внутреннего каскада (положение плазмы и полоидальные токи). Во-вторых, для управления формой плазмы во внешнем контуре применена развязывающая матрица: $M = (-CA^{-1}B)^{-1}$ [5]. Используя (1), состояния в разомкнутой системе при $\dot{x} = 0$ можно найти из: $0 = Ax + BMu$, получим $x = -A^{-1}BMu$. Следовательно, выходы после завершения переходных процессов можно найти по формуле: $y = -CA^{-1}BMu + Du = Iu + Du$, где I – единичная матрица. Таким образом,

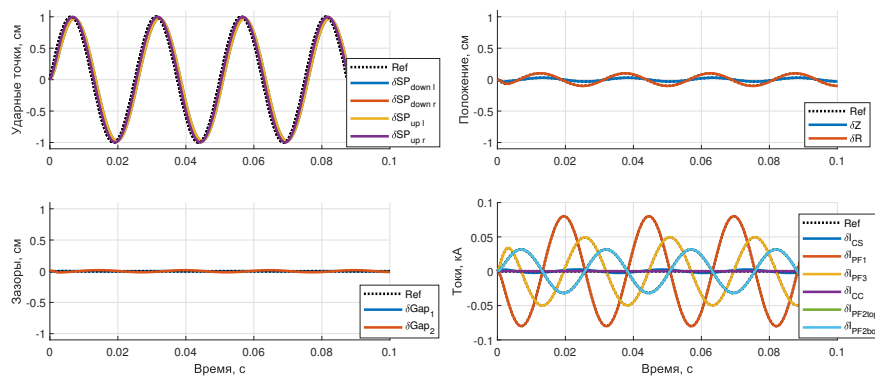


Рис. 5. Реакция системы с развязкой каналов управления на задающее воздействие по 4-м ударным точкам в виде синусоиды с частотой 40 Гц и амплитудой 1 см

каналы управления оказываются развязанными в установившемся режиме и можно применить метод QFT для настройки регуляторов внешнего каскада, отвечающих за форму плазмы (ударные точки и расстояния между сепаратрисой и камерой). Работа системы управления приведена на рис. 5.

2. Заключение

Рассмотрено два подхода для синтеза каскадной системы управления формой плазмы в модели токамака Глобус-М2 с 2-мя X-точками. Полученные системы позволяют свипировать ударные точки с частотой 40 Гц и амплитудой 1 см, следовательно, посредством магнитного управления плазмой можно снизить тепловую нагрузку на первую стенку токамака.

Исследование выполнено при поддержке гранта Российского научного фонда №21-79-20180, <https://rscf.ru/project/21-79-20180/>.

Список литературы

1. Kuteev B.V., Azizov E.A., Alexeev P.N., Ignatiev V.V., Subbotin S.A. and Tsibulskiy V.F. Development of DEMO-FNS tokamak for fusion and hybrid technologies // Nucl. Fusion 2015. Vol. 55, No. 7.
2. Mitrishkin Y.V., Kartsev N.M., Prokhorov A.A., Pavlova E.A., Korenev P.S., Konkov A.E., Kruzhkov V.I., Ivanova S.L. Tokamak plasma models development for plasma magnetic control systems design by first principle equations and identification approach // Proc. 14th International Symposium "Intelligent Systems", INTELS'20. 14-16 December 2020, Moscow, Russia. Procedia computer science, Elsevier BV (Netherlands) 2021, Vol. 186. P. 466-474.
3. McFarlane D., Glover K. Robust Controller Design Using Normalized Coprime Factor Plant Description (Lecture Notes in Control and Information Sciences, Vol. 138). Berlin: Springer, 1990. 206 p.
4. Garcia-Sanz M., Robust control engineering. Practical QFT solutions. Taylor & Francis group, 2017. 569 p.
5. Кружков В.И., Митришкин Ю.В. Двухкаскадная многоконтурная система управления формой плазмы в токамаке с развязкой каналов и робастными ПИД-регуляторами // Материалы 15-й Международной конференции «Устойчивость и колебания нелинейных систем управления» (конференция Пятницкого) (Москва, 2020). М.: ИПУ РАН, 2020. С. 276-279.