

СИНТЕЗ И МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМ МАГНИТНОГО УПРАВЛЕНИЯ ПЛАЗМОЙ В ТОКАМАКАХ С ПОДСТРОЙКОЙ ВЕРТИКАЛЬНОГО ПОЛОЖЕНИЯ МАГНИТНОЙ ОСИ

Карцев Н. М.¹

*(Федеральное государственное бюджетное
учреждение науки Институт проблем управления
им. В.А. Трапезникова РАН, Москва)*

Данная работа посвящена синтезу и моделированию многосвязных систем магнитного управления плазмой в токамаках с использованием оригинального подхода для разрешения противоречия между формой плазмы и положением ее магнитной оси. Для исследований выбраны сооружаемый токамак-реактор ITER (г. Кадараш, Франция) и действующий сферический токамак «Глобус-М» (ФТИ им. А.Ф. Иоффе, г. С-Петербург, Россия). Целью работы является изучение возможностей применения предложенного подхода к синтезу систем магнитного управления плазмой в токамаках и анализу их качества методом математического моделирования.

Ключевые слова: токамак, плазма, магнитное управление, многосвязные системы управления, обратная связь.

1. Введение

Управляемый термоядерный синтез – один из перспективных источников энергии будущего. Необходимые условия для его осуществления могут быть достигнуты посредством специальных физических установок, токамаков [19], позволяющих удерживать высокотемпературную плазму в магнитном поле. Токамак представляет собой тороидальную камеру с различны-

¹ Николай Михайлович Карцев, старший математик (n.kartsev@ya.ru).

ми исполнительными устройствами и средствами диагностики, в которой образуется и удерживается ионизованный газ – плазма.

Наиболее экономичными являются современные вертикально вытянутые токамаки, так как они требуют меньшее тороидальное магнитное поле при том же давлении плазмы по сравнению с первыми токамаками с круглым вертикальным сечением. Однако в установках данного типа существуют проблемы, связанные с вертикальной неустойчивостью плазмы и необходимостью одновременного прецизионного управления многими параметрами [17], в первую очередь, параметрами безопасности – зазорами между первой стенкой и сепаратрисой.

2. Модели объекта управления – плазмы в токамаке

Плазма в токамаке является многомерным, нелинейным объектом с распределенными параметрами [6], подверженного воздействию неконтролируемых возмущений. Магнитная конфигурация плазмы в токамаке описывается двумя уравнениями: векторным уравнением Кирхгофа [11], и уравнением равновесия Града-Шафранова [12] в частных производных. Первое включает в себя распределение полоидального магнитного потока от токов в управляющих катушках и пассивных структурах камеры. Второе связывает распределения давления плазмы и полоидального тока с полоидальным магнитным потоком таким образом, чтобы выполнялось условие баланса сил в плазме, и определяет геометрию системы вложенных магнитных поверхностей.

Для синтеза регуляторов в обратной связи систем управления формой и током плазмы установок «Глобус-М» и ИТЭР используются линейные многомерные модели в отклонениях от сценарных значений входных и выходных величин:

$$(1) \quad \frac{dx}{dt} = Ax + B\delta u + E \frac{d(\delta\omega)}{dt}, \quad \delta y = Cx + D\delta u + F\delta\omega,$$

где x – вектор состояния, соответствующий вариациям токов в пассивных и активных структурах, δu – вектор вариаций напряжений на катушках управления, $\delta\omega$ – двухкомпонентный вектор

возмущения, характеризующий сбросы давления и внутренней индуктивности плазмы при «малых срывах». К стандартному матричному виду линейного дифференциального уравнения данная система (1) сводится заменой переменных $p = x - E\delta\omega$:

$$(2) \quad \frac{dp}{dt} = Ap + [AE \quad B][\delta\omega \quad \delta u]^T, \\ \delta y = Cp + [CE + F \quad D][\delta\omega \quad \delta u]^T.$$

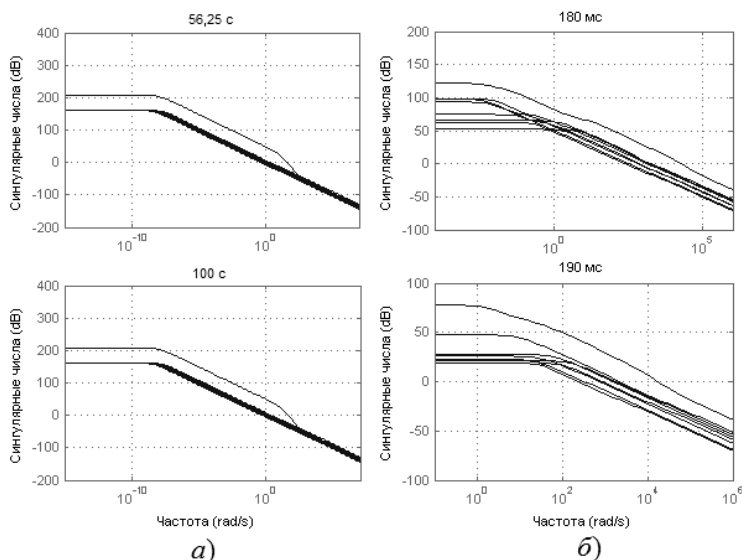


Рис. 1. Частотные характеристики сингулярных чисел моделей плазмы в установке ИТЭР (а) на 56,25 с и 100 с разряда и в установке «Глобус-М» (б) на 180 мс и 190 мс разряда.

В качестве полной модели плазмы в ИТЭР используется плазмо-физический код ДИНА [6], созданный специалистами Троицкого института инновационных и термоядерных исследований (ГНЦ РФ ТРИНИТИ, г. Троицк). Линейные модели получались в ГНЦ РФ ТРИНИТИ на основе кода ДИНА посредством его численной линеаризации [6], причем параметры сценария были взяты из базы данных проекта ИТЭР.

Для синтеза и моделирования системы управления плазмой в «Глобус-М» используется многомерная линейная модель плазмы, полученная в [16] по экспериментальным данным плазменных разрядов.

Динамические характеристики моделей плазмы в задаче магнитного управления изменяются на протяжении разряда, однако на определенном его участке – квазистационарной фазе, они остаются практически неизменными с некоторой неопределенностью в виде немоделируемой динамики. Данный факт проиллюстрирован на рис. 1, где показаны частотные характеристики сингулярных чисел для передаточных функций линейных моделей плазмы в разных точках сценария установок ИТЭР и «Глобус-М».

Исполнительные устройства систем магнитного управления токамаков – это катушки полоидального поля и центральный соленоид, расположенные на одной общей оси с камерой, со своими источниками электропитания. В ИТЭР – это сверхпроводящие катушки, каждая из которых подключена к управляемому тиристорному выпрямителю. Для подавления вертикальной неустойчивости плазмы используется дополнительное устройство – быстрый выпрямитель напряжения, подключенный параллельно к четырем полоидальным катушкам. В качестве моделей выпрямителей для синтеза и численного моделирования используются звенья первого порядка с транспортным и инерционным запаздыванием:

$$W_{PF}(s) = e^{-0.015s} / (0.015s + 1), \quad W_{VS}(s) = e^{-0.0075s} / (0.0075s + 1).$$

На установке «Глобус-М» для катушек полоидального поля используются тиристорные выпрямители, аппроксимируемые передаточной функцией: $W_{PF}(s) = e^{-0.0033s} / (0.0033s + 1)$. Для подавления вертикальной неустойчивости используется дополнительная магнитная катушка, подключенная к импульсному управляемому источнику питания – инвертору тока, работающему в автоколебательном режиме, аппроксимируемому в линейном приближении коэффициентом усиления 250 [5].

3. Постановка задачи

Основными задачами магнитного управления плазмой в вытянутом по вертикали токамаке являются:

- подавление вертикальной неустойчивости,
- управление формой и током плазмы.

Выделение данных задач приводит к разделению контуров системы по скорости процессов управления: контур вертикальной стабилизации является относительно быстрым, а контур управления формой и током плазмы – медленным. На рис. 2 приведена обобщенная схема системы магнитного управления плазмой в токамаке с двумя контурами в ИТЭР.

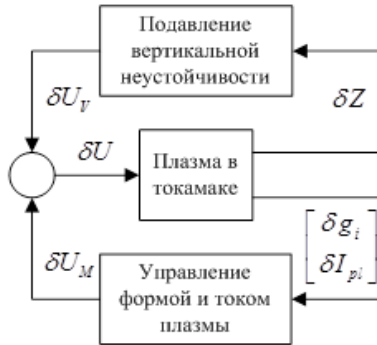


Рис. 2. Схема двухконтурной системы магнитного управления плазмой

В схеме магнитного управления, предложенной в ИТЭР [10], для подавления вертикальной неустойчивости используется стабилизация около нуля скорости вертикального положения плазмы [4], [7], [2], [8]. Однако при таком подходе система с замкнутым контуром вертикальной стабилизации не является строго устойчивой, и вертикальное положение может неуправляемо изменяться в переходном процессе стабилизации скорости. Задача управления непосредственно вертикальным положением плазмы, в этом случае, решается совместно с задачей управления формой и током плазмы регулятором в многомер-

ном контуре [3], который является медленным, относительно контура вертикальной стабилизации.

В установке «Глобус-М», имеющей сравнительно малые размеры и продолжительность плазменного разряда, для подавления вертикальной неустойчивости используется стабилизация непосредственно вертикального положения плазмы без управления формой.

При введении управления формой и током плазмы, у этой задачи возникает противоречие с задачей стабилизации вертикального положения [15] как для установок типа ИТЭР, так и для малых токамаков типа «Глобус-М». Значения зазоров между внутренней стенкой камеры и поверхностью плазмы, определяющие ее форму, связаны с вертикальным положением плазменного шнура. Данный факт иллюстрируется на рис. 3, из которого видно, что вертикальное положение плазмы определяется положением ее магнитной оси Z , связанного со значениями зазоров g_1, \dots, g_6 .

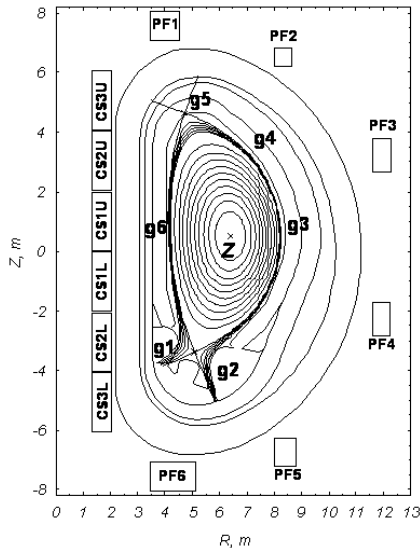


Рис. 3. Полоидальная магнитная конфигурация токамака ИТЭР

Сценарные параметры разряда: ток плазмы, зазоры, вертикальное положение и т.д. рассчитываются по определённой модели плазмы, исходя из условия ее равновесного состояния. Однако во время реального разряда, особенно в фазах ввода и вывода плазменного тока, плазма не может находиться в равновесном состоянии, ее параметры изменяются, проявляются ее динамические свойства, не учтённые при расчете сценария. Также ввиду отличий модели плазмы, используемой для синтеза, от реального физического объекта проявляется эффект несоответствия рассчитанных сценарных параметров друг другу. Система магнитного управления плазмой с независимым контуром стабилизации вертикального положения и многомерным контуром управления формой и током плазмы в таком случае автоматически находит компромисс для указанного противоречия, но с заметной потерей качества управления для обеих задач.

Для улучшения качества работы системы магнитного управления плазмой можно воспользоваться тем фактом, что основными параметрами безопасности являются зазоры между внутренней стенкой камеры и поверхностью плазмы (сепаратрисой). Плазма не должна касаться камеры, иначе это приведет к ее разрушению, этому, в первую очередь, служит задача управления формой плазмы. Если данное требование выполняется, то контур стабилизации вертикального положения можно использовать для обеспечения только устойчивости, невзирая на качество управления. Также в этом случае не имеет значения величина отклонения вертикального положения от сценария, многомерный контур, поддерживая требуемые параметры формы, обеспечит необходимую магнитную конфигурацию, поскольку они связаны.

На основании вышеизложенного предлагается следующая схема синтеза системы магнитного управления плазмой:

- 1) Синтезировать скалярный регулятор для системы стабилизации вертикального положения плазмы около заданного значения. Такой подход [1] обеспечит строго устойчивую замкнутую систему с одним лишь контуром вертикальной стабилизации.

- 2) Для стабилизированной по вертикали плазмы синтезировать многомерную систему управления формой и током для минимизации отклонения реальных выходных параметров от их сценарных значений.
- 3) В полученной двухконтурной системе управления синтезировать алгоритм вычисления значения требуемого вертикального положения по параметрам формы и тока плазмы.

4. Система магнитного управления плазмой в ИТЭР

4.1. СИНТЕЗ ДЛЯ ИТЭР

Для облегчения задачи синтеза производится ее декомпозиция на две задачи. Сначала ввиду наличия в модели объекта интегрирующих звеньев, соответствующих сверхпроводящим катушкам управления, исходная многомерная модель корректируется путем введения в медленном контуре отрицательной многомерной обратной связи по токам в катушках. Для синтеза матрицы обратной связи используется метод динамической развязки каналов управления [9]. Многомерная модель, от входов выпрямителей $\delta U_{MREF} \in R^{11}$ до выходов – вариаций значений токов в катушках $\delta I_{coil} \in R^{11}$ редуцируется до 11^{ого} порядка. Желаемая матрица A_c замкнутой системы с редуцированной моделью полагается диагональной $A_c = \Lambda = \text{diag}(-1, \dots, -1)$. Из уравнения замкнутой системы следует:

$$(3) \quad \begin{cases} \frac{dx}{dt} = \hat{A}x + \hat{B}(r - K_{fb}\delta I_{coil}), \\ \delta I_{coil} = \hat{C}x, \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} A_c = \hat{A} - \hat{B}K_{fb}\hat{C} = \Lambda, \\ K_{fb} = -\hat{B}^{-1}(\hat{A} - \Lambda)\hat{C}^{-1}, \end{cases}$$

где r – задающее воздействие по токам в обмотках управления. Для полученной системы (3) синтезируется регулятор скалярного контура стабилизации вертикального положения плазмы около заданного значения методом робастного синтеза на основе нормализованной взаимно простой факторизации [13], [14]. Известно, что размерность робастного регулятора зависит от размерности исходной модели объекта управления, поэтому модель 127^{ого} порядка от входа быстрого выпрямителя δU_{VSREF} до выхода – вариации вертикального положения δZ , используе-

мая для синтеза, редуцируется до 4^{ого} порядка. Регулятор $K_{VS}(s)$, синтезированный с весами $W_1(s) = 2 \cdot 10^7/s$, $W_2 = 1$ в расширенной модели объекта $G(s) = W_1(s)G_0(s)W_2(s)$, где $G_0(s)$ – передаточная функция исходной модели, обеспечивает требуемое время переходного процесса 1 с и робастный запас устойчивости $\varepsilon = 0,1033$, что можно считать приемлемым.

Для сравнения полученной системы стабилизации вертикального положения плазмы с системой стабилизации ее скорости на рис. 4 показаны их полюса в окрестности мнимой оси.

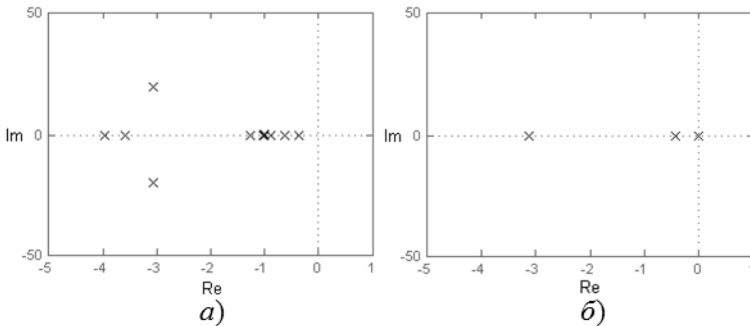


Рис. 4. Нули и полюса систем стабилизации вертикального положения (а) и стабилизации вертикальной скорости (б) плазмы в ИТЭР. В случае (б) на оси есть один мнимый полюс

Из рис. 4 видно, что в системе стабилизации вертикального положения плазмы нет полюсов в правой полуплоскости комплексной плоскости и, в отличие от системы стабилизации вертикальной скорости, нет полюсов на мнимой оси – полученная система *строго* устойчива.

Для синтеза регулятора в многомерной системе управления формой и током плазмы $K_{MIMO}(s)$ также используется метод нормализованной взаимно простой факторизации. Модель объекта управления 193^{ого} порядка от входа замкнутого контура коррекции токов $r \in R^{11}$ до выходов – вариаций зазоров $\delta g \in R^6$ и вариации тока плазмы δI_{pl} редуцируется до 50^{ого} порядка. Выход вариации тока плазмы масштабируется с коэффициентом 10^8 . Регулятор многомерного контура, синтезированный с весовыми

функциями $W_1(s) = 10^6/s \cdot I^{7 \times 7}$, $W_2 = I^{7 \times 7}$, обеспечивает запас робастной устойчивости $\varepsilon = 0,2575$.

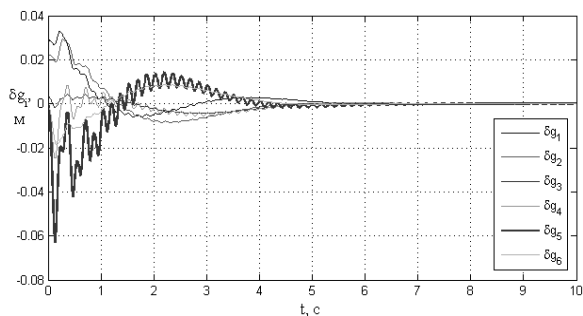


Рис. 5. Вариации зазоров при «малом срыве» и стабилизации вертикального положения около нуля в ИТЭР

Как видно из представленных на рис. 5 графиков вариаций зазоров при возмущении типа «малый срыв» на квазистационарной фазе разряда, система управления формой и током плазмы не удовлетворяет требованиям качества – вариации зазоров достаточно велики (6 см), и наблюдаются сильные осцилляции.

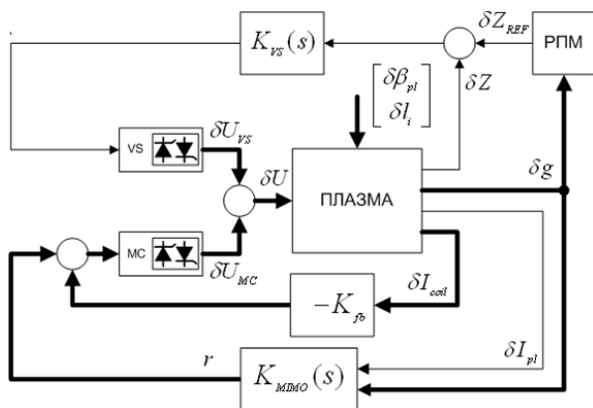


Рис. 6. Схема синтезированной системы магнитного управления плазмой в ИТЭР

Для улучшения качества работы системы управления формой и током плазмы в контур стабилизации вертикального положения плазмы вводиться уставка δZ_{REF} , вычисляемая дискретным регулятором с прогнозирующей моделью (РПМ) [18] по информации об отклонениях зазоров:

$$(4) \quad \Delta Z_{REF}(n) = K_x x_k(n) + K_u \delta Z_{REF}(n-1),$$

где n – номер текущего такта, $\Delta Z_{REF}(n) = \delta Z_{REF}(n) - \delta Z_{REF}(n-1)$ – изменение уставки на текущем такте, x_k – вектор состояния линейной модели объекта.

На рис. 6 приведена схема синтезированной системы магнитного управления плазмой в ИТЭР.

4.2. РЕЗУЛЬТАТЫ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ДЛЯ ИТЭР

На рис. 7 – 9 приведены результаты численного моделирования синтезированной системы магнитного управления плазмой в ИТЭР при действии возмущения типа «малый срыв» на линейной модели плазмы.

На рис. 10 – 13 приведены результаты численного моделирования синтезированной системы магнитного управления плазмой в ИТЭР на плазмо-физическом коде ДИНА с точки разряда 56,25 с до 107 с.

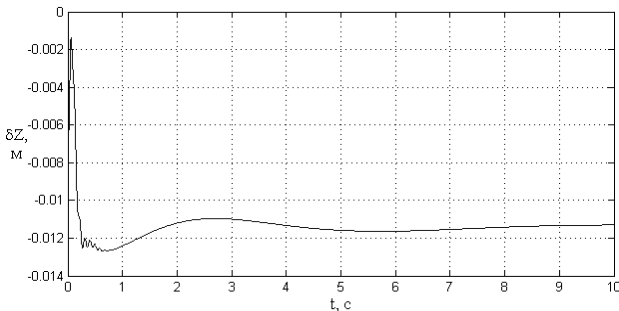


Рис. 7. Вариация вертикального положения плазмы на линейной модели ИТЭР

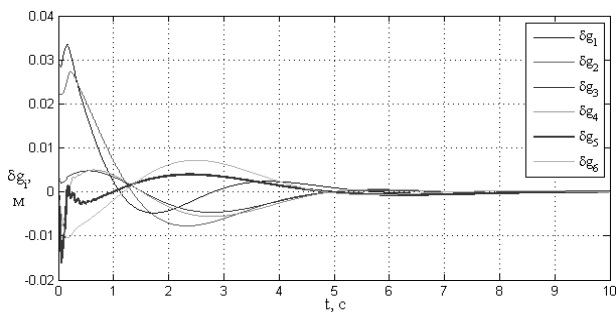


Рис. 8. Вариации зазоров на линейной модели ИТЭР

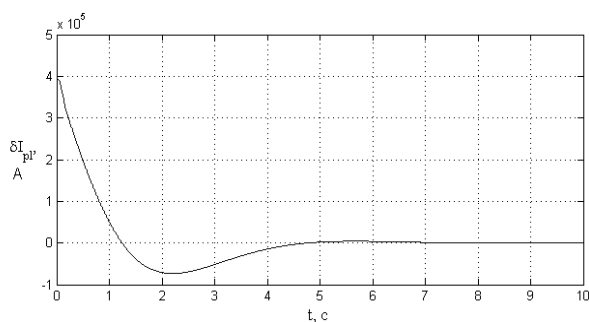


Рис. 9. Вариация тока плазмы на линейной модели ИТЭР

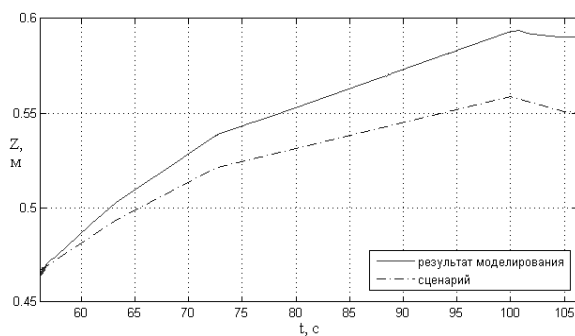


Рис. 10. Вертикальное положение плазмы и его сценарий в ИТЭР на плазмо-физическом коде ДИНА

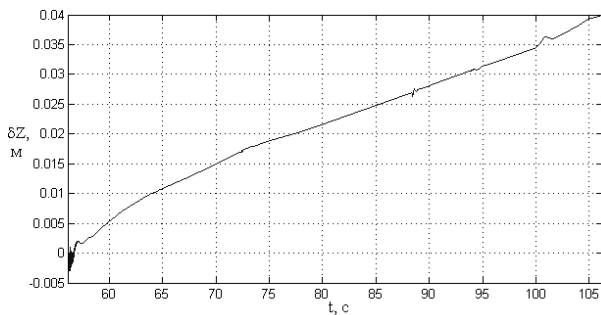


Рис. 11. Вариация вертикального положения плазмы в ИТЭР на плазмо-физическом коде ДИНА

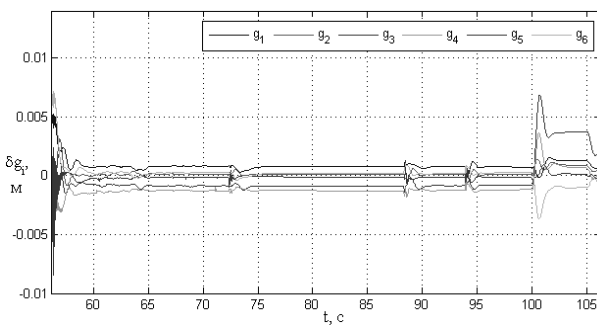


Рис. 12. Вариации зазоров в ИТЭР на плазмо-физическом коде ДИНА

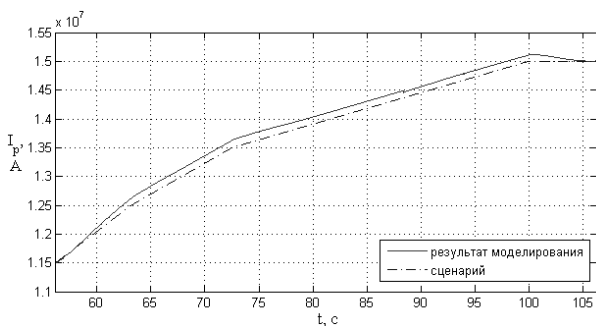


Рис. 13. Ток плазмы и его сценарий в ИТЭР на плазмо-физическом коде ДИНА

5. Система магнитного управления плазмой в токамаке «Глобус-М»

5.1. СИНТЕЗ ДЛЯ «ГЛОБУС-М»

Линейные модели плазмы в установке «Глобус-М» аналогичны (2) [16], но в них отсутствует составляющая модели возмущения типа «малый срыв».

Регулятор в контуре стабилизации вертикального положения плазмы в «Глобус-М» также синтезируется методом на основе нормализованной взаимно простой факторизации. Модель объекта $75^{\text{ого}}$ порядка для вертикального положения плазмы, от входа инвертора тока U_{HFCREF} до выхода – вариации вертикального положения δZ , масштабируется с коэффициентами 2 по входу и 0,01 по выходу. Регулятор вертикальной стабилизации $K_{VS}(s)$ получен редукцией до $3^{\text{его}}$ порядка из регулятора полной размерности, синтезированного с весовыми функциями $W_1(s) = (0.250s + 250)/s$, $W_2 = 1$. Он обеспечивает время переходного процесса 5 мс и робастный запас устойчивости $\varepsilon = 0,2788$.

До синтеза регулятора управления формой и током плазмы объект, с замкнутыми контурами вертикальной и горизонтальной стабилизации, охватывается $6^{\text{ю}}$ контурами управления вариациями токов в катушках полоидального поля $\delta I_{PF\&CS} \in R^6$. Для каждого контура настраивается ПД-регулятор согласованно с регуляторами соседних контуров. Для этого используется процедура итеративной последовательной настройки. ПД-регуляторы подключаются к входам выпрямителей, питающих катушки полоидальных полей.

Регулятор управления формой и током плазмы $K_{MIMO}(s)$ так же выполняет функцию расчета уставки вариации вертикального положения. Для его синтеза используется модель от входа уставки вариации вертикального положения δZ_{REF} и входов контуров управления токами в катушках до выходов – вариаций зазоров $\delta g \in R^6$ и вариации тока плазмы δI_{pla} . Данная модель масштабируется по входу уставки с коэффициентом 0,01, по входам контуров управления токами с коэффициентами 10 каждый, по выходу вариации тока плазмы – 500 и по выходам вариаций зазоров – 0,001 каждый.

Для синтеза методом на основе нормализованной взаимно простой факторизации используются весовые функции $W_{1ZREF}(s) = 1/(0.05s + 1)$, $W_{1IREF}(s) = (0.1s + 100)/s$, $W_2 = 1$, обеспечивающие запас робастной устойчивости $\varepsilon = 0,522$ и отработку возмущения по вертикальному положению в 1 см за 5 мс.

На рис. 14 приведена схема синтезированной системы магнитного управления плазмой в токаке «Глобус-М».

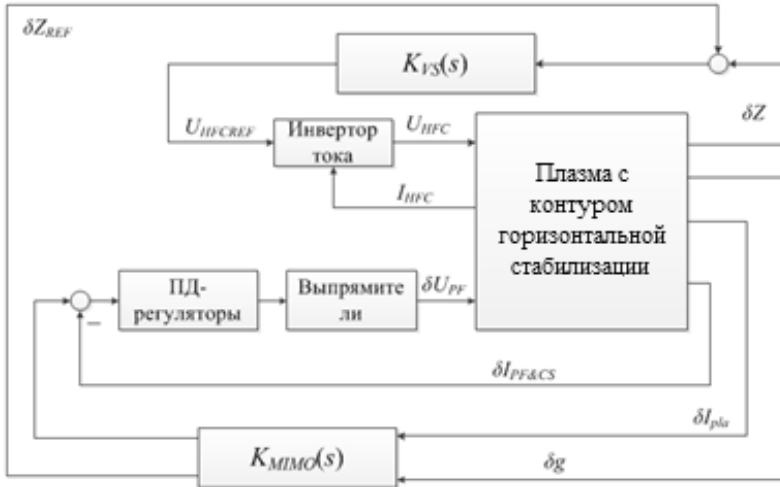


Рис. 14. Схема системы магнитного управления плазмой в токаке «Глобус-М»

5.2. РЕЗУЛЬТАТЫ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ДЛЯ «ГЛОБУС-М»

На рис. 15 – 17 приведены результаты численного моделирования синтезированной системы магнитного управления плазмой в токаке «Глобус-М» при действии возмущения по вертикальному положению плазмы в 1 см с учетом полной нелинейной модели инвертора тока в контуре стабилизации вертикального положения [5].

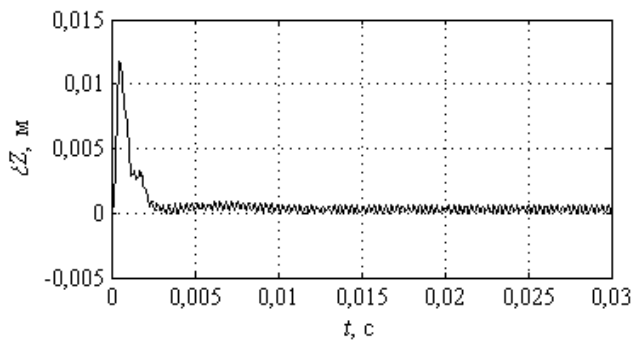


Рис. 15. Вариация вертикального положения плазмы в токамаке «Глобус-М»

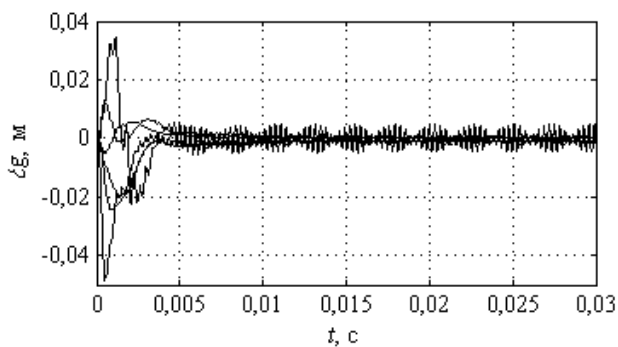


Рис. 16. Вариации зазоров в токамаке «Глобус-М»

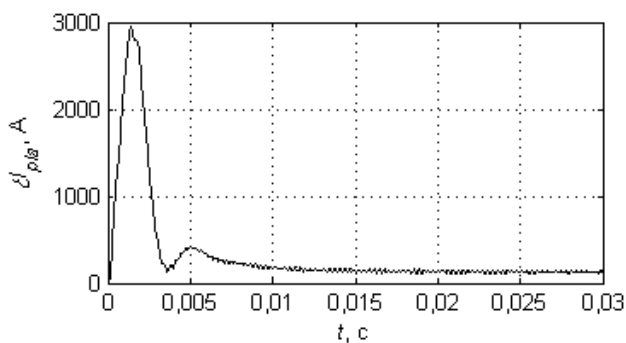


Рис. 17. Вариация тока плазмы токамаке в «Глобус-М»

6. Заключение

Для токамаков «Глобус-М» и ИТЭР синтезированы системы магнитного управления плазмой с применением подстройки вертикального положения магнитной оси плазмы. Для синтеза регуляторов данных систем использован метод робастного синтеза на основе нормализованной взаимно простой факторизации [13], [14].

Численным моделированием синтезированных систем показана их работоспособность, что подтверждает возможность использования для синтеза предложенного подхода с подстройкой вертикального положения магнитной оси.

При моделировании плазменного разряда в ИТЭР на коде ДИНА параметры формы и тока плазмы поддерживаются с достаточной точностью при том, что сигнал вертикального положения плазмы заметно отклонен от сценарного значения из-за введения дополнительной автоматически настраиваемой уставки. Из сравнения рис. 5 и 8 видно, что использование подстройки вертикального положения плазмы уменьшает максимальное отклонение вариаций зазоров с 6 см до 3,5 см, и исключает осцилляции.

Численным моделированием системы магнитного управления плазмой в токамаке «Глобус-М», с учетом полной нелинейной модели исполнительного устройства импульсного действия, показано, что она обеспечивает требуемое качество управления. При отработке возмущения по вертикальному положению в 1 см длительность процесса составляет 5 мс, и максимальное значение отклонений вариаций зазоров составляет 5 см.

Литература

1. КАРЦЕВ Н.М., МИТРИШКИН Ю.В. *Система магнитного управления плазмой в токамаке со стабилизацией ее вертикального положения* : Тезисы докл. XI Международного семинара «Устойчивость и колебания нелинейных систем управления» имени Е.С. Пятницкого / Инст. пробл. управ.

- им. В.А. Трапезникова РАН, Москва: Изд-во ИПУ РАН, 2010. – С. 165–166.
2. КАРЦЕВ Н.М., МИТРИШКИН Ю.В. *Стабилизация полюсов нестационарной системы с параметрической неопределенностью модели объекта управления* : Студ. науч. вестник. Сб. тезис. докл. общеунивер. науч.-тех. конф. «Студенческая весна - 2008» / МГТУ им. Н.Э. Баумана. Москва: Изд. науч.-тех. ассоц. «Актуальные проблемы фундаментальных наук», 2008. Том IV. Ч. 1. –С. 139-141.
 3. КАРЦЕВ Н.М., МИТРИШКИН Ю.В. *Разработка H_∞ регулятора для обеспечения баланса качества слежения за скалярными параметрами плазменного разряда в токамаке и робастного запаса устойчивости* : Студ. науч. вестник. Сб. тезис. докл. общеунивер. науч.-тех. конф. «Студенческая весна - 2009» / МГТУ им. Н.Э. Баумана. Москва : Изд. науч.-тех. ассоц. «Актуальные проблемы фундаментальных наук», 2009. Том IV. Ч. 1. – С. 121-123.
 4. КОРОСТЕЛЕВ А.Я., МИТРИШКИН Ю.В. *Идентификация модели скорости вертикального движения плазмы в токамаке* : Студ. науч. вестник. Сб. тезис. докл. общеунивер. науч.-тех. конф. «Студенческая весна – 2008» / МГТУ им. Н.Э. Баумана. Москва :Изд. науч.-тех. ассоц. «Актуальные проблемы фундаментальных наук», 2008. Том IV. Ч. 1.– С. 141-142.
 5. КУЗНЕЦОВ Е.А., МИТРИШКИН Ю.В. *Автоколебательная система стабилизации неустойчивого вертикального положения плазмы сферического токамака «ГЛОБУС-М»* : Автореф. дис. канд. техн. наук. – Москва, 2005.
 6. ЛУКАШ В.Э., ДОКУКА В.Н., ХАЙРУТДИНОВ Р.Р. *Программно-вычислительный комплекс ДИНА в системе МАТЛАВ для решения задач управления плазмой токамака* // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Термоядерный синтез. – 2004. – Вып. 1. – С. 40–49.
 7. МИТРИШКИН Ю.В., КАРЦЕВ Н.М. *Синтез и моделирование системы стабилизации динамики нестационарного объекта* : Тезисы докл. X Международного семинара «Устойчивость и колебания нелинейных систем управления» имени Е.С. Пятницкого, Инст. пробл. управ. им. В.А. Тра-

- пезникова РАН, Москва: Изд-во ИПУ РАН, 2008. – С. 200-201.
8. МИТРИШКИН Ю.В., КАРЦЕВ Н.М. *Стабилизация замкнутой системы управления с неопределенностью в переменных параметрах объекта* // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Приборостроение. – 2009. – Вып. 4. – С. 68–83.
 9. МИТРИШКИН Ю.В., КОРОСТЕЛЕВ А.Я. *Каскадная система слежения за током и формой плазмы в токамаке с развязкой каналов управления* // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Приборостроение, –2010. Т. 79, №2, – С. 21-38.
 10. *Официальный сайт проекта ИТЭР* [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.iter.org>.
 11. ФОРТОВ В.Е., ХРАПАК А.Г., ЯКУБОВ И.Т. *Физика неидеальной плазмы: учеб. пособ.* – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2004. – 528 с.
 12. KHAYRUTDINOV R. R. AND LUKASH V. E. *Studies of Plasma Equilibrium and Transport in a Tokamak Fusion Device with the Inverse-Variable Technique* // Journal Comp. Physics, 1993. Vol. 109, – P. 193-201.
 13. McFARLANE D., GLOVER K. *Robust stabilization of normalized coprime factors: An explicit H_∞ solution* // Proc. 1988 Amer. Contr. Conf., Atlanta, GA, 1988.
 14. McFARLANE D., GLOVER K. *A loop shaping design procedure Using H_∞ synthesis* // IEEE Transactions on automatic control, 1992. Vol. 37, № 6.
 15. MITRISHKIN Y.V., KARTSEV N.M. *Hierarchical Plasma Shape, Position, and Current Control System for ITER* // Proc. the 50th IEEE Conf. on Decision and Control, Orlando, FL, USA, 2011. – P. 2620-2625.
 16. 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.

17. MITRISHKIN Y., KOROSTELEV A., KARTSEV N., KHAYRUTDINOV R., DOKUKA V., KADURIN A., VERTINSKIY A., SUSHIN I. *Synthesis and Modeling of Plasma Vertical Speed, Shape, and Current Profile Control Systems in Tokamak* // Proc. International Workshop “Control for Nuclear Fusion”, Eindhoven University of Technology, Netherlands, 2008.
18. WANG L. *Model Predictive Control System Design and Implementation using MATLAB, Advances of Industrial control* – London: Springer-Verlag, 2009.
19. WESSON J. *Tokamaks* – Oxford: Clarendon Press, 1997.

SYNTHESIS AND MODELING OF PLASMA MAGNETIC CONTROL SYSTEMS WITH TUNING OF MAGNETIC AXIS VERTICAL POSITION

Nikolay Kartsev, V.A. Trapeznikov Institute of Control Sciences of RAS, Moscow, senior mathematician (n.kartsev@ya.ru).

Abstract: The paper reports the results of synthesis and modeling of tokamak plasma magnetic control systems. The original approach for solving internal contradictions in these systems is used. The ITER (Cadarache, France) and “Globus-M” (Ioffe Physical-Technical Institute of RAS, St. Petersburg, Russia) tokamaks are considered. The goal of this study is to research capabilities to use our approach for magnetic control systems synthesis for tokamaks of different kinds.

Keywords: tokamak, plasma, magnetic control, multivariable control systems, feedback.