### Управление в технических системах

© 2025 г. А.Е. КОНЬКОВ (konkov@ipu.ru), В.И. КРУЖКОВ (kruzhkov@ipu.ru), Е.А. ПАВЛОВА, канд. физ.-мат. наук (pavlova@physics.msu.ru), П.С. КОРЕНЕВ (pkorenev@ipu.ru) (Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, Москва), Б.Ж. ЧЕКТЫБАЕВ, PhD (chektybaev@nnc.kz), С.В. КОТОВ (ksvlondon@mail.ru), Д.Б. ЗАРВА, канд. техн. наук (zarva@nnc.kz), А.А. ЖАКСЫБАЕВА (zhaksybaeva@nnc.kz) (Институт атомной энергии НЯЦ РК, Курчатов)

### ПОЛУНАТУРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЦИФРОВОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ВЕРТИКАЛЬНЫМ ПОЛОЖЕНИЕМ ПЛАЗМЫ В ТОКАМАКЕ КТМ<sup>1</sup>

Статья посвящена разработке цифровой системы управления неустойчивым вертикальным положением плазмы в токамаке КТМ. Синтезирован регулятор с постоянными параметрами на массиве моделей объекта, при этом один регулятор обеспечивает заданное качество управления и запасы робастной устойчивости одновременно для двух моделей объекта с переменными параметрами. Проведен анализ робастной устойчивости. Работоспособность системы проверена проведением полунатурного моделирования с использованием полной нелинейной модели инвертора напряжения, с учетом ограничений на его максимальный ток и напряжение.

*Ключевые слова*: токамак, КТМ, полунатурное моделирование, робастный регулятор, LMI.

DOI: 10.31857/S0005231025010044, EDN: JQKONJ

#### 1. Введение

Системы управления вертикальным положением плазмы критически важны для функционирования современных D-образных токамаков, в которых плазма вытянута по вертикали в полоидальном сечении [1–4]. Вертикальное положение плазмы в таких токамаках неустойчиво, поэтому для обеспечения плазменных разрядов применяется система управления с обратной связью. Воздействие на вертикальное положение плазмы осуществляется посредством магнитного поля, создаваемого током в обмотке горизонтального

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> Работа выполнена при финансовой поддержке проекта РНФ (№ 21-79-20180), а также научно-технической программы ИРН № ВR23891779 «Научно-техническое обеспечение экспериментальных исследований на казахстанском материаловедческом токамаке КТМ» программно-целевого финансирования Министерства энергетики Республики Казахстан.



Рис. 1. Сечение токамака КТМ.

управляющего поля (ОГУП) [5]. Система управления вертикальным положением плазмы должна обеспечивать устойчивость вертикального положения плазмы и выполнение заданного сценария по вертикальному положению плазмы в течение разряда.

Токамак КТМ (Казахстанский Токамак Материаловедческий) [6, 7] расположен в г. Курчатов (Казахстан). Помимо ОГУП на токамаке используются шесть обмоток управления (ОУ) формой плазмы, обмотка индуктора (ОИ), наводящего плазменный ток, обмотка тороидального магнитного поля (ОТП) и обмотка пассивной стабилизации положения плазмы. Расположение обмоток токамака показано на рис. 1.

Плазма в токамаке является нестационарным объектом управления, в частности динамика вертикального положения плазмы может значительно меняться в течение разряда, кроме того, она может существенно отличаться в разрядах с различным сценарием. Ранее в [8] были рассчитаны модели вертикального движения плазмы для нескольких разрядов, синтезирована система управления током в ОГУП и получены оценки области управляемости вертикального положения плазмы. На токамаке КТМ планируется ввод в эксплуатацию нового источника питания ОГУП в виде инвертора напряжения в режиме широтно-импульсной модуляции (ШИМ). Целью данной работы является разработка и полунатурное моделирование цифровой системы управления вертикальным положением плазмы с новым источником питания. При этом синтезируется стационарный регулятор, который обеспечивает приемлемое качество управления и необходимые запасы робастной устойчивости замкнутой системы управления одновременно для двух различных сценариев плазменного разряда. Полунатурное моделирование (Hardware-in-the-loop simulation) [9] является важным этапом перед внедрением разработанной системы управления в практику экспериментов. При таком способе моделирования регулятор работает на реальном оборудовании, функционально идентичном тому, которое будет использоваться на практике. При достаточной точности модели объекта управления полунатурное моделирование позволяет гарантировать работоспособность разрабатываемой системы управления и сократить затраты на внедрение. В данной работе предлагается методика проведения полунатурного моделирования каскадной системы управления вертикальным положением плазмы и приведены его результаты в различных режимах работы.

Далее в разделе 2 приводится постановка задачи, структурная схема синтезируемой системы управления и описание используемых моделей плазмы. В разделе 3 описан синтез каскадной системы управления вертикальным положением плазмы. В разделе 4 проводится анализ запасов робастной устойчивости синтезированной системы по амплитуде и запаздыванию. В разделе 5 приведены результаты полунатурного моделирования синтезированной системы управления в рабочих и экстремальных режимах, что дает возможность проверить результаты, полученные в разделах 3 и 4. В Заключении приводятся основные итоги работы. В Приложении проводится сравнение цифровой системы управления, синтезированной непосредственно на дискретной модели объекта, и дискретизированной системы, настроенной на непрерывной модели, при условии, что метод настройки регулятора одинаковый, это является обоснованием выбора метода синтеза системы управления.

#### 2. Постановка задачи

Структурная схема цифровой каскадной системы управления вертикальным положением плазмы в КТМ приведена на рис. 2, где  $Z_{ref}$  – задающее воздействие на вертикальное положение плазмы, Z – вертикальное положение плазмы,  $e_Z = Z_{ref} - Z$  – ошибка по вертикальному положению плазмы,  $I_{HFC\ ref}$  – задающее воздействие на ток в ОГУП,  $I_{HFC}$  – ток в ОГУП,  $e_{I_{HFC}} =$  $= I_{HFC\ ref} - I_{HFC}$  – ошибка по току в ОГУП,  $U_{HFC}$  – напряжение на ОГУП,  $u_{PWM}$  – управляющий сигнал.



Рис. 2. Структурная схема цифровой каскадной системы управления вертикальным положением плазмы в КТМ с инвертором напряжения в режиме ШИМ.



Рис. 3. Принципиальная схема Н-моста с источником постоянного напряжения.

Исполнительным устройством в системе управления является источник питания ОГУП в виде инвертора напряжения в режиме ШИМ с параметрами: три уровня напряжения:  $[-1 \ 0 \ 1]$  кВ; мощность 2 МВт, соответствующая максимальному току  $\pm 2$  кА; частота ШИМ 1 кГц. Инвертор напряжения состоит из H-моста и ШИМ-контроллера, который преобразует управляющий сигнал  $u_{PWM}$  в последовательности импульсов  $v_{1-4}$ , управляющих затворами транзисторов H-моста (рис. 3). Цифро-аналоговый преобразователь (ЦАП) в системе управления отсутствует, его роль выполняет ШИМ-контроллер, когда он является частью цифрового управляющего устройства и цифровые выходы  $v_{1-4}$  подаются на затворы транзисторов через оптические развязки.

ОГУП состоит из двух секций, соединенных последовательно-встречно. Напряжение и ток в ОГУП связаны соотношением

$$L\dot{I}_{HFC}(t) + RI_{HFC}(t) = U_{HFC}(t),$$

где R = 212 мОм – активное сопротивление ОГУП, а L = 17 мГн – индуктивность ОГУП. Дискретная передаточная функция ОГУП имеет вид

(1) 
$$P_{HFC}(z) = \frac{R^{-1} \left( 1 - \exp(-T_s R/L) \right)}{z - \exp(-T_s R/L)}, \quad I_{HFC}(z) = P_{HFC}(z) U_{HFC}(z),$$

где z– переменная Z-преобразования,  $T_s=1~{\rm mc}$ – шаг дискретизации.

Модели вертикального движения плазмы в КТМ [8] получены по экспериментальным данным двух наиболее типичных в прошедшей экспериментальной кампании на токамаке КТМ плазменных разрядов с током плазмы 500 кА [10]: разряд № 5121 с вытянутостью (отношением вертикального и горизонтального диаметров плазмы) 1,4 и нормальной длительностью, разряд № 5126 с вытянутостью 1,6 и малой продолжительностью удержания плазмы, а затем представлены в виде линейных моделей в пространстве состояний с переменными параметрами в дискретном времени:

$$\begin{cases} x(T_sk + T_s) = A(T_sk)x(T_sk) + B(T_sk)u(T_sk), \\ y(T_sk) = C(T_sk)x(T_sk), \end{cases}$$

где  $x = \begin{bmatrix} I_{PF}^{\mathrm{T}} & I_{VV}^{\mathrm{T}} & I_{P} \end{bmatrix}^{\mathrm{T}} \in \mathbb{R}^{24 \times 1}$  – вектор состояния,  $I_{PF} \in \mathbb{R}^{8 \times 1}$  – вектор токов в обмотках полоидального поля (включая  $I_{HFC}$ ),  $I_{VV} \in \mathbb{R}^{15 \times 1}$  – токи на вакуумной камере и пассивных структурах,  $I_{P}$  – ток плазмы,  $u = U_{HFC}$  – вход,  $y = \begin{bmatrix} Z & I_{HFC} \end{bmatrix}^{\mathrm{T}}$  – вектор выхода.



Рис. 4. Изменение величины единственного неустойчивого полюса моделей вертикального движения плазмы в течение разряда.

Набор  $\{A, B, C\}$  матриц для каждой модели вертикального движения плазмы рассчитан с шагом  $T_s = 1$  мс:

1) модель разряда № 5121 – для 1001 временной точки от 2,50 до 3,50 с;

2) модель разряда № 5126 – для 61 временной точки от 2,44 до 2,50 с.

Обе модели имеют один неустойчивый полюс, который значительно меняется в течение разряда, что показано на рис. 4. Для синтеза регулятора был вычислен массив дискретных передаточных функций

(2) 
$$P_n(z) = C_n(zI - A_n)^{-1}B_n,$$

где индекс n обозначает номер временной точки разряда, для которой была рассчитаны матрицы модели:  $A_n = A(T_s n), B_n = B(T_s n)$  и  $C_n = C(T_s n)$ .

Необходимо синтезировать регулятор, с которым система управления будет иметь необходимый запас робастной устойчивости для обеспечения приемлемого качества управления одновременно для двух моделей вертикального движения плазмы с переменными параметрами. Система управления должна также иметь достаточный запас робастной устойчивости по фазе, чтобы сохранять устойчивость при введении в контур обратной связи по вертикальному положению плазмы транспортного запаздывания величиной до 10 мс (10 тактов с шагом 1 мс), которая является верхней оценкой всех возможных запаздываний в системе сбора, обработки и передачи данных токамака КТМ. Запаздывание моделируется введением в контур обратной связи дискретной передаточной функции  $z^{-10}$ .

#### 3. Синтез каскадной системы управления

Регуляторы в обоих каскадах управления синтезированы методом [11], который позволяет синтезировать дискретный регулятор на массиве дискретных моделей объекта и осуществлять размещение АЧХ передаточной функции разомкнутой системы (Loop Shaping). Синтез проводится техникой линейных матричных неравенств через выпукло-вогнутую процедуру. В Приложении рассматривается альтернативный подход, когда регулятор синтезируется на модели объекта в непрерывном времени, а затем проводится дискретизация регулятора.

Сначала синтезируется внутренний каскад управления током в ОГУП на модели (1), линейная модель инвертора напряжения получена методом идентификации последовательного соединения ОГУП и инвертора напряжения с использованием подхода [12]. В результате был синтезирован ПИ-регулятор с дискретной передаточной функцией

(3) 
$$C_{HFC}(z) = K_{P_{HFC}} + K_{I_{HFC}} \frac{T_s z}{z-1}, \quad u_{PWM}(z) = C_Z(z) e_{HFC}(z),$$

где  $K_{P_{HFC}} = 0,004$  В/А,  $K_{I_{HFC}} = 0,15$  В/(А × с). Сигнал на выходе регулятора  $u_{PWM}$  ограничен диапазоном ±1 В, который определяется параметрами ШИМ-контроллера. Синтезированная система управления током в ОГУП обеспечивает максимально возможное быстродействие с учетом ограничений источника питания, обеспечивающего скорость нарастания тока в ОГУП до  $U_{\rm max}/L = 58,8$  кА/с. Эта система управления использовалась в [8] для оценки области управляемости вертикального положения плазмы.

Синтез внешнего каскада проводился на массиве дискретных передаточных функций внутреннего каскада:  $Z(z) = G_n(z)I_{HFC ref}(z)$ ,

(4) 
$$G_n(z) = P_n(z)A(z)C_{HFC}(z)\left(I + P_n(z)A(z)C_{HFC}(z)\right)^{-1}$$

где  $A(z) = U_{\max} z^{-T_{PWM}/T_s}$  – линейная модель инвертора напряжения,  $U_{\max} = 1 \text{ кB}, T_{PWM}/T_s = 1, n$  – индекс из (2). Таким образом, один регулятор будет удовлетворять заданным критериям качества и запасам робастной устойчивости одновременно для двух моделей с переменными параметрами. В результате был синтезирован ПИД-регулятор с дискретной передаточной функцией

(5) 
$$C_Z(z) = K_{P_Z} + K_{I_Z} \frac{T_s z}{z-1} + K_{D_Z} \frac{z-1}{T_s z}, \quad I_{HFC ref}(z) = C_{I_{HFC}}(z) e_Z(z),$$

где  $K_{P_Z} = 245,3276$  A/м,  $K_{I_Z} = 3,831$  кA/(м × c),  $K_{D_Z} = 0,366$  (A × c)/м. Сигнал на выходе регулятора  $I_{HFC \ ref}$  ограничен диапазоном  $\pm 2$  кA.

При синтезе регулятора реализован подход Anti-Windup [13] для предотвращения насыщения сигнала на выходе регулятора и появления вследствие этого внутренней неустойчивости в системе управления. В обоих регуляторах используется механизм клямпинга (clamping), при котором интегрирование прекращается, когда сигнал на выходе регулятора выходит за пределы установленного диапазона, а выход и вход интегратора имеют одинаковый знак.

На рис. 5 приведены результаты синтеза регулятора методом [11], показаны заданные функции формы и сингулярные числа дискретных переда-



Рис. 5. АЧХ передаточных функций системы управления вертикальным положением плазмы.

точных функций синтезированной системы с моделями для временных точек [3,229; 3,299; 3,449] с модели разряда № 5121 и [2,479; 2,489; 2,5] с модели разряда № 5126.

Приведены АЧХ массива передаточных функций разомкнутой системы

(6) 
$$L_n(z) = G_n(z)C_Z(z), \quad Z(z) = L_n(z)e_Z(z),$$

где  $G_n(z)$  – массив передаточных функций внутреннего каскада (4), а  $C_Z(z)$  – передаточная функция регулятора (5), массива функций чувствительности

$$S_n(z) = (I + L_n(z))^{-1}, \quad e_Z(z) = S_n(z)Z_{ref}(z),$$

массива дополнительных функций чувствительности

$$T_n(z) = L_n(z)S_n(z), \quad Z(z) = S_n(z)Z_{ref}(z),$$

массива функций статической и низкочастотной чувствительности

$$F_n(z) = \left(G_n(1)K_{I_Z}T_s\right)^{-1}(z-1),$$
для малых  $\omega, \ z = \exp(j\omega T_s),$ 

массива Q-параметров

$$Q_n(z) = C_Z(z)S_n(z), \quad I_{HFC \ ref}(z) = Q_n(z)Z_{ref}(z)$$

и массива передаточных функций от внешнего входного возмущения до  $e_Z(z)$ 

$$W_n(z) = -S_n(z)G_n(z)$$

Заданные функции формы  $b_S$  и  $b_T$  ограничивают массивы передаточных функций  $S_n(z)$  и  $T_n(z)$  на всем частотном диапазоне, обеспечивая требуемую область робастности и качества управления замкнутой системы.

# 4. Анализ робастной устойчивости каскада управления положением плазмы

Для вычисления запасов робастной устойчивости замкнутой системы использовался массив передаточных функций разомкнутой системы (6). На рис. 6 приведены запасы робастной устойчивости по амплитуде, а на рис. 7 – по запаздыванию.



Рис. 6. Запас робастной устойчивости по амплитуде линейной модели замкнутой системы управления.



Рис. 7. Запас робастной устойчивости по запаздыванию линейной модели замкнутой системы управления.



Рис. 8. Диаграмма устойчивости нелинейной системы управления.

Запас робастной устойчивости по запаздыванию (delay margin) вычислен по формуле [14]:

$$T_M = \frac{\phi_M}{\omega_c} \frac{\pi}{180^\circ},$$

где  $\phi_M$  – запас робастной устойчивости по фазе,  $\omega_c$  – частота среза АЧХ (частота, при которой АЧХ передаточной функции разомкнутой системы первый раз пересекает уровень 1). В наихудшем случае, который приходится на конец обоих разрядов, синтезированная система управления имеет удовлетворительный запас робастной устойчивости по амплитуде, составляющий ±10 дБ

(рис. 6). Запас робастной устойчивости по запаздыванию (рис. 7) также превышает необходимые 10 мс на всем протяжении обоих разрядов.

На рис. 8 показаны диаграммы устойчивости нелинейной системы управления с полной моделью инвертора напряжения и моделью вертикального движения плазмы с переменными параметрами.

Варьировались запаздывание и коэффициент усиления в контуре обратной связи по вертикальному положению плазмы. Нелинейная система имеет ограниченную область управляемости, поэтому чем больше величина задающего воздействия  $Z_{ref}$ , тем меньше ее запасы робастной устойчивости. Зеленый цвет обозначает ситуации, когда система асимптотически устойчива, красный – когда не является. Желтым показаны запасы робастной устойчивости линейной модели в наихудшем случае (рис. 6 и 7).

#### 5. Полунатурное моделирование

Полунатурное моделирование цифровой системы управления проводилось на стенде реального времени [15] в ИПУ РАН на двух целевых машинах реального времени (ЦМРВ). Структурная схема системы управления для полунатурного моделирования приведена на рис. 9.

Цифровое управляющее устройство реализовано на ЦМРВ «Регулятор», где, помимо регуляторов обоих каскадов управления, находится ШИМ-контроллер. Такой подход позволяет отказаться от использования ЦАП, что повышает надежность и быстродействие системы, управляющий сигнал  $u_{PWM}$ не преобразуется в аналоговый: не нужно тратить время на преобразование сигнала в ЦАП, не нужно обеспечивать помехозащищенность линии передачи аналогового сигнала  $u_{PWM}$ , сокращаются затраты на реализацию ШИМ-контроллера в аналоговом виде.

На ЦМРВ «Модель объекта» находятся модель вертикального движения плазмы и модель H-моста с источником постоянного напряжения, которая реализована в Simscape Electrical. Шаг дискретизации регуляторов равен 1 мс, а шаг дискретизации ШИМ-контроллера, H-моста и модели вертикального движения плазмы – 100 мкс. Шаги дискретизации отличаются в 10 раз для того, чтобы обеспечить изменение коэффициента заполнения ШИМ с шагом 10%. Если при внедрении системы управления будет необхо-



Рис. 9. Структурная схема цифровой каскадной системы управления вертикальным положением плазмы в КТМ при проведении полунатурного моделирования.

димость обеспечить еще меньший шаг коэффициента заполнения ШИМ, то ШИМ-контроллер может быть реализован на ПЛИС.

Концепция полунатурного моделирования систем управления предполагает, что часть системы является реальной, тогда как другая часть представлена моделью. В данном случае все компоненты управляющего устройства реализованы на ЦМРВ «Регулятор». Для того чтобы данное управляющее устройство было функционально аналогичным тому, которое будет использоваться в реальной системе управления (рис. 2), на выходе ЦМРВ «Модель объекта» находятся два ЦАП.

#### 5.1. Моделирование системы управления в рабочем режиме

Результаты полунатурного моделирования синтезированной системы в рабочем режиме с задающим воздействием на вертикальное положение плазмы в 5 см приведены на рис. 10. Помимо переходного процесса по вертикальному положению плазмы и электрических сигналов источника питания (напряжение, ток и мощность) приведено изменение неустойчивого полюса модели для каждого разряда. Синтезированный регулятор обеспечивает приемлемое ка-



Рис. 10. Моделирование системы управления вертикальным положением плазмы в КТМ. Задающее воздействие по вертикальному смещению плазмы  $Z_{ref} = 5$  см.

чество управления одновременно для двух моделей вертикального движения плазмы. Требуемая мощность инвертора напряжения не превышает 1,2 МВт при максимально возможной мощности 2 МВт.

#### 5.2. Моделирование системы управления в экстремальных режимах

На рис. 11 приведены результаты полунатурного моделирования с максимальным вертикальным смещением плазмы, при котором замкнутая система сохраняет устойчивость и приемлемое качество управления, а на рис. 12 – с максимально возможным запаздыванием в контуре обратной связи по вертикальному положению плазмы. Смещение плазмы в токамаке КТМ более чем на 10 см по вертикали на практике не требуется, так как при этом произойдет столкновение сепаратрисы плазмы с лимитером токамака, следовательно, синтезированная система управления позволяет осуществлять управление вертикальным положением плазмы в КТМ во всем возможном



Рис. 11. Моделирование системы управления вертикальным положением плазмы в KTM с максимально возможным задающим воздействием на вертикальное положение плазмы.



Рис. 12. Моделирование системы управления вертикальным положением плазмы в КТМ с максимально возможным запаздыванием в контуре обратной связи.

диапазоне. В обоих случаях величина временного запаздывания превышает необходимую величину в 10 мс.

В [8] была рассчитана верхняя оценка области управляемости вертикального положения плазмы, для разряда № 5121 она составляет 23 см, а для разряда № 5126 – 26 см. Фактическая область управляемости для разряда № 5121 на 4 см больше полученной ранее оценки, это объясняется тем, что в [8] для оценки использовалась модель для одной временной точки разряда с наибольшим значением неустойчивого полюса, которая не находится в конце разряда, и возможная неустойчивость не успевает развиться. Этим же объясняется тот факт, что полученное максимальное запаздывание в 14 мс (рис. 12,*a*) превышает минимальный запас робастной устойчивости по запаздыванию (рис. 7,*a*).

#### 6. Заключение

Работоспособность системы управления продемонстрирована полунатурным моделированием на двух моделях вертикального движения плазмы, рассчитанных по экспериментальным данным разрядов с различным сценарием. При моделировании использовалась полная модель инвертора напряжения в режиме ШИМ, учитывающая ограничение по мощности. При достаточной верификации используемых моделей, полунатурное моделирование позволяет гарантировать работоспособность системы управления при внедрении в практику экспериментов.

Максимально возможное вертикальное смещение плазмы в синтезированной системе с инвертором напряжения в режиме ШИМ составляет 27 см на модели разряда № 5121 и 22 см на модели разряда № 5126, что превышает реально необходимый диапазон в 10 см. Максимально возможное транспортное запаздывание в контуре обратной связи по вертикальному положению плазмы, при котором сохраняется устойчивость и приемлемое качество управления, составляет 14 мс на модели разряда № 5121 и 23 мс на модели разряда № 5126, что также больше необходимой величины в 10 мс.

В данной работе был использован робастный подход, когда синтезируется один регулятор, удовлетворяющий критериям качества управления и запасам робастной устойчивости одновременно для нескольких моделей вертикального движения плазмы. Возможен и другой, адаптивный подход, когда регулятор настраивается для конкретного сценария или когда его параметры меняются в течение разряда. Адаптивный подход позволяет получить лучшее качество управления, так как в случае робастного подхода качество управления ограничено моделью объекта в «наихудшем случае». В данной задаче робастный подход предпочтительнее адаптивному, поскольку не требует перенастройки регулятора при изменении сценария плазменного разряда.

#### ПРИЛОЖЕНИЕ

## Сравнение цифровой системы управления с дискретизированной аналоговой

Метод синтеза [11] позволяет синтезировать как дискретные, так и непрерывные системы управления. Распространен подход, когда в цифровой системе управления применяется дискретизированный регулятор. К примеру, в [16–19] для управления плазмой в токамаке были синтезированы непрерывные регуляторы. Для демонстрации недостатков такого подхода проведено следующее сравнение.

На рис. 13,*а* приведен результат синтеза непрерывного регулятора на модели объекта в непрерывном времени с теми же функциями формы, которые использовались для синтеза дискретного регулятора в разделе 3. Функции формы в методе синтеза [11] задают качество управления и запасы робастной устойчивости замкнутой системы, поэтому синтезированная аналоговая система управления имеет примерно одинаковые с цифровой системой, полученной ранее в разделе 3, качество управления и запасы робастной устойчивости.



Рис. 13. АЧХ передаточных функций аналоговой и дискретизированной систем управления вертикальным положением плазмы.

Синтезированный аналоговый ПИД-регулятор задан передаточной функцией

$$\hat{C}_Z(s) = \hat{K}_{P_Z} + \hat{K}_{I_Z} \frac{1}{s} + \hat{K}_{D_Z} \frac{s}{\tau s + 1},$$

где  $\hat{K}_{P_Z} = 266,9$  А/м,  $\hat{K}_{I_Z} = 10,3$  кА/(м × c),  $\hat{K}_{D_Z} = 0,53$  (А × c)/м,  $\tau = 100$  мкс, s – переменная преобразования Лапласа. После дискретизации этого регулятора методом ZOH были вычислены АЧХ передаточных функций дискретизированной системы (рис. 13,  $\delta$ ). Дискретизированная система управления является неустойчивой.

В [20] показано, что дискретизация может несущественно влиять на деградацию качества управления и запасов робастной устойчивости системы при условии, если полоса пропускания замкнутой системы меньше частоты дискретизации хотя бы в 30 раз. Полоса пропускания замкнутой системы управления меняется в зависимости от временной точки разряда от 10 до 79 Гц, из чего следует, что шаг дискретизации  $T_s = 1$  мс почти в 2,5 раза больше, чем необходимо для сохранения качества управления при дискретизации. Кроме того, модель объекта управления не является минимально-фазовой, поскольку она содержит звенья запаздывания, что также вносит вклад в потерю устойчивости системы управления при дискретизации.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Mitrishkin Y.V., Korenev P.S., Prokhorov A.A., et al. Plasma Control in Tokamaks. Part 1. Controlled thermonuclear fusion problem. Tokamaks. Components of control systems // Advanc. Syst. Sci. Appl. 2018. V. 18. No. 2. P. 26–52.
- Mitrishkin Y.V., Kartsev N.M., Pavlova E.A., et al. Plasma Control in Tokamaks. Part 2. Magnetic plasma control systems // Advanc. Syst. Sci. Appl. 2018. V. 18. No. 3. C. 39–78.

- Mitrishkin Y.V., Kartsev N.M., Konkov A.E., et al. Plasma Control in Tokamaks. Part 3.1. Plasma Magnetic Control Systems in ITER // Advanc. Syst. Sci. Appl. 2020. V. 20. No. 2. P. 82–97.
- Mitrishkin Y.V., Kartsev N.M., Konkov A.E., et al. Plasma Control in Tokamaks. Part 3.2. Simulation and Realization of Plasma Control Systems in ITER and Constructions of DEMO // Advanc. Syst. Sci. Appl. 2020. V. 20. No. 3. P. 136– 152.
- Ariola M., Pironti A. Magnetic Control of Tokamak Plasmas. Springer International Publishing, 2016.
- Korotkov V.A., Azizov E.A., Cherepnin Yu.S., et al. Kazakhstan tokamak for material testing conceptual design and basic parameters // Fusion Engineering and Design. 2001. V. 56. P. 831–835.
- 7. Зарва Д.Б., Дериглазов А.А., Батырбеков Э.Г. и др. Электротехнический комплекс системы импульсного электропитания токамака КТМ // ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез. 2018. Т. 41. № 2. С. 59–70.
- 8. Коренев П.С., Коньков А.Е., Чектыбаев Б.Ж. и др. Оценка области управляемости вертикальным положением плазмы в токамаке КТМ с катушкой HFC // ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез. 2024. Т. 47. № 3.
- 9. *Mihalic F., Truntic M., Hren A.* Hardware-in-the-Loop Simulations: A Historical Overview of Engineering Challenges. Electronics. 2022. V. 11. P. 2462.
- 10. Батырбеков Э.Г., Тажибаева И.Л., Бакланов В.В., и др. Исследования в области управляемого термоядерного синтеза в Республике Казахстан // ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез. 2024. Т. 47. № 2. С. 15–22.
- Konkov A.E., Mitrishkin Y.V. Synthesis Methodology for Discrete MIMO PID Controller with Loop Shaping on LTV Plant Model via Iterated LMI Restrictions // Mathematics, MDPI Publ. 2024. V. 12. No. 6. P. 810.
- Konkov A.E., Mitrishkin Y.V. Comparison Study of Power Supplies in Real-Time Robust Control Systems of Vertical Plasma Position in Tokamak // IFAC-PapersOnLine. 2022. V. 55. No. 9. P. 327–332.
- Grimm G., Hatfield J., Postlethwaite I., et al. Antiwindup for stable linear systems with input saturation: An LMI-based synthesis // IEEE Trans. Automat. Contr. 2003. V. 48. No. 9. P. 1509–1525.
- 14. Astrom K., Hagglund T. Advanced PID control. ISA-The Instrumentation, Systems, and Automation Society, 2006.
- 15. Митришкин Ю.В., Коньков А.Е., Коренев П.С. Цифровой моделирующий стенд реального времени для управления плазмой в токамаках // Материалы XVI Международной конференции Устойчивость и колебания нелинейных систем управления (конференция Пятницкого), 2022. С. 286–289.
- Mitrishkin Y.V., Pavlova E.A., Kuznetsov E.A., Gaydamaka K.I. Continuous, saturation, and discontinuous tokamak plasma vertical position control systems // Fusion Engineering and Design. 2016. V. 108. P. 35–47.
- 17. Mitrishkin Y.V., Prokhorov A.A., Korenev P.S., Patrov M.I. Hierarchical robust switching control method with the Improved Moving Filaments equilibrium reconstruction code in the feedback for tokamak plasma shape // Fusion Engineering and Design. 2019. V. 138. P. 138–150.

- 18. Кружсков В.И. Настройка системы управления положением плазмы и полоидальными токами токамака Глобус-М2 и реализация на стенде реального времени // Труды 17-й Всероссийской школы-конференции молодых ученых «Управление большими системами» (УБС'2021, Москва). Москва–Звенигород: Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, 2021. С. 704–710.
- Mitrishkin Y.V., Korenev P.S., Konkov A.E., Kartsev N.M., Smirnov I.S. New horizontal and vertical field coils with optimised location for robust decentralized plasma position control in the IGNITOR tokamak // Fusion Engineering and Design. 2022. Vol. 174. P. 112993.
- Franklin G., Powell J.D., Workman M.L. Digital Control of Dynamic Systems. Ellis-Kagle Press, 1997.

Статья представлена к публикации членом редколлегии Н.Н. Бахтадзе.

Поступила в редакцию 11.07.2024 После доработки 13.09.2024 Принята к публикации 20.09.2024