

УДК 62-533.7

РЕАЛИЗАЦИЯ КОНТУРА УПРАВЛЕНИЯ ТОКОМ ОБМОТКИ ТОРОИДАЛЬНОГО ПОЛЯ ТОКАМАКА КТМ

Д.Д. Шифанов, В.М. Павлов

Томский политехнический университет

E-mail: shifanov@tomics.tomsk.ru

Описана реализация контура управления током обмотки тороидального поля токамака КТМ. Разработана система автоматического регулирования тока обмотки, проведен расчет передаточных функций звеньев входящих в ее состав, проведена реализация полученной системы в среде Simulink пакета Matlab, а также рассчитаны параметры настройки регуляторов. Проведен эксперимент с разработанной моделью.

Ключевые слова:

Токамак КТМ, обмотка тороидального поля, тиристорный преобразователь, система автоматического управления.

Key words:

Tokamak KTM, toroidal field coil, thyristor converter, automatic control system.

Основным назначением термоядерной материаловедческой установки — Казахстанского Токамака Материаловедческого (КТМ) является исследование взаимодействий плазма-стенка вакуумной камеры, плазма-пластины дивертора, плазма-лимитер при воздействии потоков энергии от 0,1 до 20 МВт/м² в широком диапазоне экспозиций и поведения испытуемых материалов в условиях воздействия на них мощных корпускулярных и тепловых потоков, а также переменных и постоянных электрических и магнитных полей, возникающих в процессе плазменных разрядов. Эти эксперименты необходимы для того, чтобы сделать вывод о применимости исследуемых материалов для изготовления внутрикамерных элементов первого международного энергетического термоядерного реактора ITER.

В настоящее время существует много действующих исследовательских установок, однако нет общепринятых стандартов заложенных при их проектировании, т. к. они создавались для проведения определенного спектра экспериментов. Это такие установки как MAST, JET, JT-60. Отличительной особенностью всех проектов является уникальность каждого из них. При проектировании системы управления КТМ, была поставлена задача: создать систему автоматического управления током тороидальной обмотки, обеспечивающую выход тока на рабочее значение 50 кА, за интервал времени не превышающий 1 с, с перерегулированием не превышающим 1 %.

Рассмотрим систему управления плазмой (СУП), в состав которой организационно входит контур управления током тороидальной обмотки. СУП в составе комплекса автоматизации экспериментов токамака КТМ обеспечивает управление в течение разряда основными параметрами плазмы, такими как форма, ток, положение и энергосодержание [1].

Основной задачей СУП является удержание плазменного шнура внутри рабочей камеры и при-

дание ему необходимой формы, посредством магнитных полей, формируемых обмотками управления. Исходя из того, что силовые линии магнитных полей, создаваемые тороидальной и полоидальными обмотками взаимоперпендикулярны, в системе управления плазмой выделяют два независимых контура управления полем (рис. 1):

- полоидальным, который осуществляет управление формой плазменного шнура, путем изменения тока полоидальных обмоток, по рассчитанной программе управления;
- тороидальным, который осуществляет создание и поддержание квазистационарного магнитного поля, препятствующего уходу заряженных частиц из объема вакуумной камеры. В связи с особенностью алгоритма функционирования данного контура, а именно выход на уставку и поддержание рабочего значения тока, его работа осуществляется в автономном режиме после получения команды «Начало разряда».

Рассмотрим далее непосредственно контур управления током тороидальной обмотки, программно реализованный в блоке управления. Структурная схема каскадной САР тока тороидальной обмотки представлена на рис. 2.

Определение передаточной функции объекта управления (обмотка тороидального поля)

Основной задачей тороидальной обмотки является создание квазистационарного магнитного поля, для удержания заряженных частиц внутри объема рабочей камеры. Магнитное поле создается за счет постоянного тока протекающего через обмотку. Обмотка тороидального магнитного поля представляет собой элемент, который можно представить как последовательное соединение активного сопротивления R и индуктивности L .

Передаточную функцию обмотки тороидального магнитного поля можно выразить из дифференциального уравнения динамики, для последова-

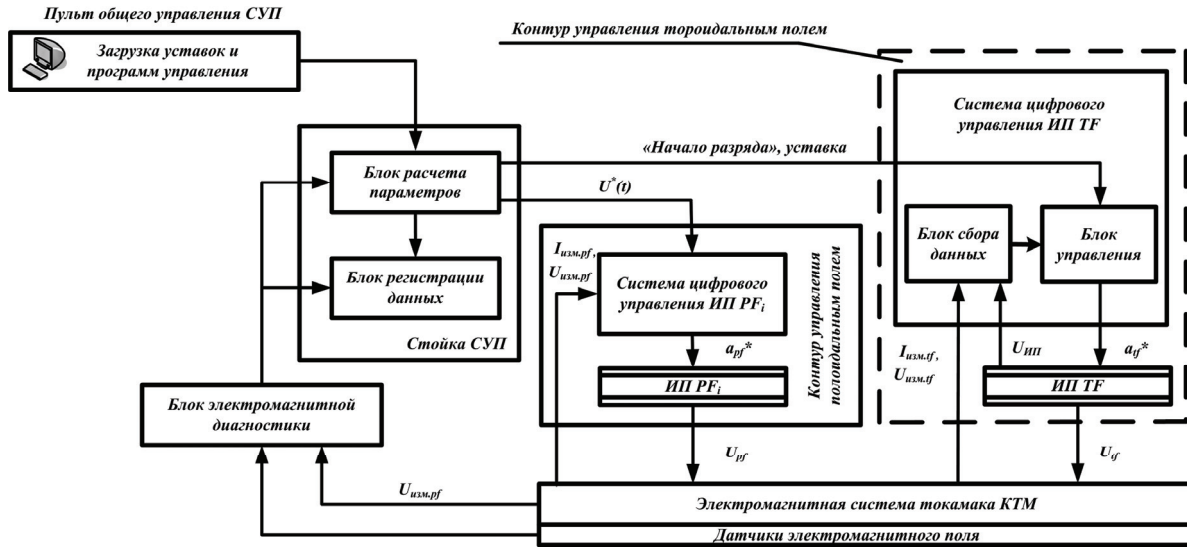


Рис. 1. Структурная схема СУП: ИП – источник питания, PF – полоидальное поле, TF – тороидальное поле

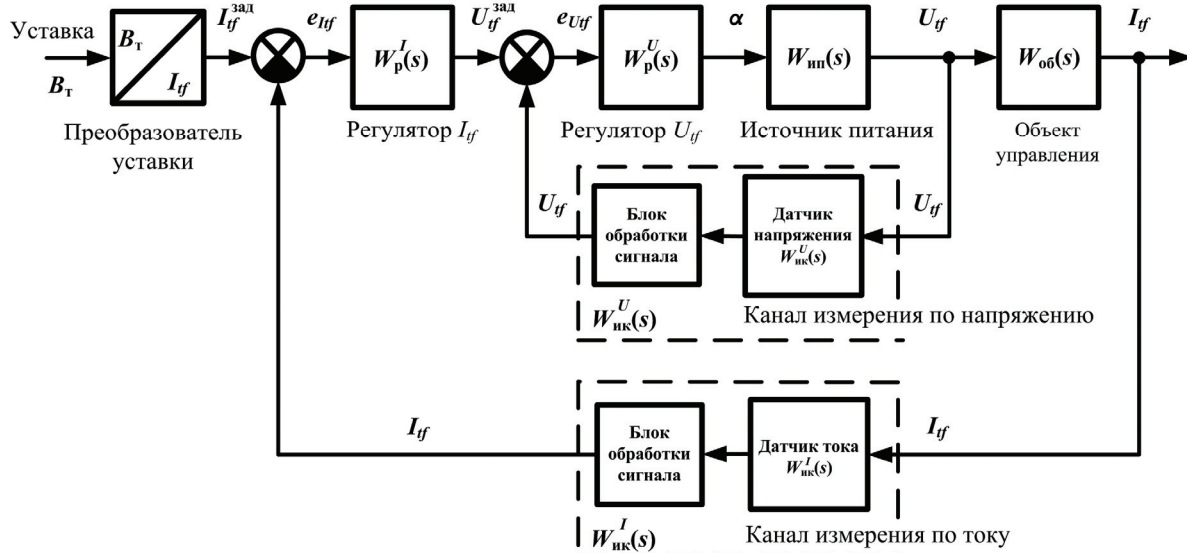


Рис. 2. Структурная схема САР тока тороидальной обмотки

тельно соединенных активной и индуктивной нагрузок:

$$\frac{L_{tf}}{R_{tf}} \cdot \frac{\partial I_{tf}(t)}{\partial t} + I_{tf}(t) = \frac{U_{tf}(t)}{R_{tf}},$$

где R_{tf} и L_{tf} – сопротивление и индуктивность обмотки тороидального поля, I_{tf} и U_{tf} – ток и напряжение обмотки тороидального поля соответственно.

Это уравнение соответствует дифференциальному уравнению апериодического звена первого порядка без запаздывания, передаточная функция которого имеет следующий вид:

$$W_{ob}(s) = \frac{K_{ob}}{T_{ob}s + 1},$$

где $K_{ob} = \frac{1}{R_{tf}} = \frac{1}{9 \cdot 10^{-3}} = 111,11 \text{ Ом}^{-1}$,

$$K_{ob} = \frac{1}{R_{tf}} = \frac{1}{9 \cdot 10^{-3}} = 111,11 \text{ Ом}^{-1},$$

Определение передаточной функции источника питания

Регулирующим органом для контура управления током тороидальной обмотки выступает источник питания, созданный на основе тиристорных преобразователей, рис. 3.

Питание тиристорных преобразователей осуществляется от трехфазной сети 10 кВ через преобразовательный трансформатор Tr . Трансформатор подключается к сети через разъединитель SA . Трансформатор имеет 5 обмоток. Первичная обмотка трансформатора соединена треугольником, одна пара вторичных обмоток соединена звездой, а дру-

гая пара соединена треугольником. Это обеспечивает сдвиг фаз на выходе трансформатора на 30 эл. град.

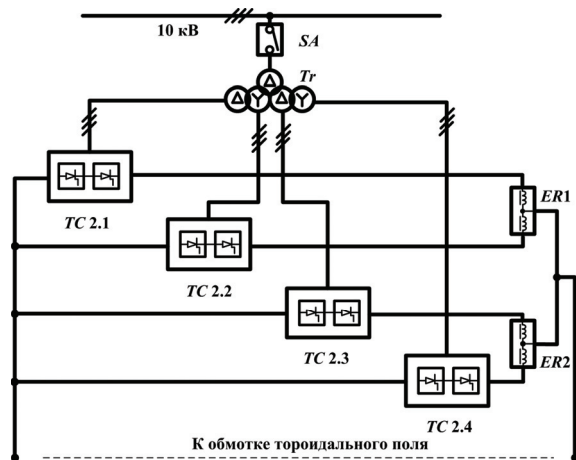


Рис. 3. Схема подключения источника питания: SA – разъединитель; Tr – трансформатор; TC – тиристорный преобразователь; ER – уравнильный реактор

Источник питания состоит из 4 шестипульсных схем выпрямления (TC2.1–TC2.4), которые включены в цепь параллельно. За счет сдвига фаз на 30 эл. град. во вторичных обмотках преобразовательного трансформатора, подключенных к тиристорным преобразователям TC2.3 и TC2.4 достигается 12-ти пульсное выпрямление тока. На выходе тиристорных преобразователей для ограничения зоны прерывистых токов установлены два уравнильных реактора ER1 и ER2. Уравнильные реакторы обеспечивают независимую параллельную работу двух схем и представляют собой двухобмоточные дроссели с замкнутым магнитопроводом, имеющие значительную индуктивность.

Определим передаточную функцию источника питания.

Передаточную функцию тиристорного преобразователя можно представить в виде [2]:

$$W_{TC}(s) = \frac{K_{TC}}{T_{TC}s + 1},$$

где K_{TC} – коэффициент передачи тиристорного преобразователя; T_{TC} – постоянная времени тиристорного преобразователя.

$$K_{TC} = \frac{3\sqrt{3}U_{TF}}{\pi\alpha} \cos \alpha, \quad (*)$$

где U_{TF} – напряжение питания обмотки тороидального магнитного поля; α – угол открытия тиристор.

$$T_{TC} = \frac{\pi}{m\omega_0} = \frac{1}{2mf_0},$$

где m – пульсность тиристорного преобразователя ($m=6$); ω_0 – круговая частота питающей сети; f_0 – частота питающей сети (50 Гц).

$$T_{TC} = \frac{1}{2 \cdot 6 \cdot 50} = 0,00167 \text{ с.}$$

Для проверки эффективности работы тиристорного преобразователя было проверено соответствие расчетной и реальной регулировочных характеристик. Для этого была измерена регулировочная кривая с реального тиристорного выпрямителя трехфазного напряжения, характеристики которого аналогичны характеристикам выпрямителей используемых в проекте токамака КТМ, рис. 4.

Реальная и линеаризованная расчетная регулировочные характеристики отличаются мало. При расчете передаточных функций тиристорных преобразователей и источника питания в целом, было решено использовать линеаризованную характеристику, с последующей ее корректировкой относительно регулировочной характеристики тиристорных преобразователей, используемых на токамаке КТМ.

Напряжение, В

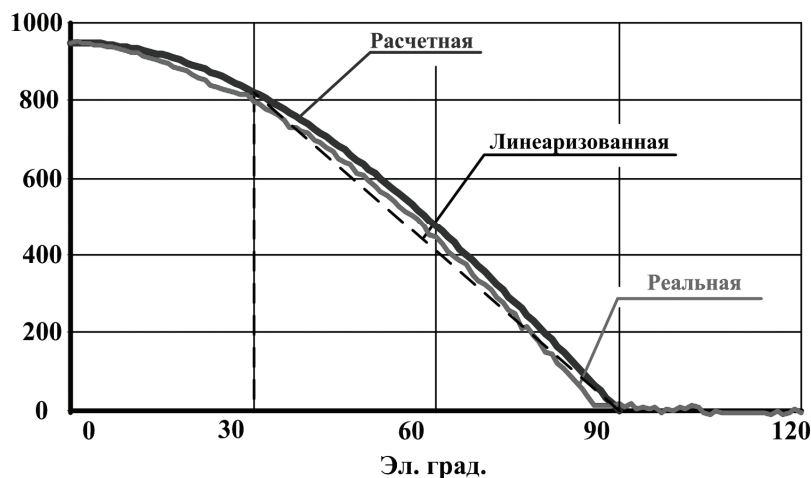


Рис. 4. Сравнение регулировочных кривых тиристорного выпрямителя

При расчёте коэффициента передачи тиристорного преобразователя следует обратить внимание на то, что он является нелинейным. Необходимо учесть, что при наличии индуктивности в цепи нагрузки задержка вступления в работу очередных вентилей создаёт задержку на такой же угол α моментов записания проводящих вентилей.

При изменении угла α в диапазоне от 0 до 60° переход напряжения U_d с одного линейного напряжения на другое осуществляется в пределах положительной полярности участков линейных напряжений. Поэтому форма кривой U_d и его среднее значение одинаковы, как при активной, так и при активно-индуктивной нагрузках.

При $\alpha > 60^\circ$ вид кривой U_d зависит от характера нагрузки. В случае активно-индуктивной нагрузки ток продолжает протекать через вентили и вторичную обмотку трансформатора после изменения полярности их линейного напряжения, в связи с чем, в кривой U_d появляются участки линейных напряжений отрицательной полярности.

Зависимости значений среднего напряжения при активно-индуктивной нагрузке могут быть найдены по формуле:

$$U = U_d \cos \alpha, \quad \alpha \in [0; \frac{\pi}{2}].$$

Таким образом, при проведении синтеза регулятора для активно-индуктивной нагрузки следует учитывать тот факт, что при разных углах открытия больше $\pi/3$ вид регулировочной характеристики зависит от характера нагрузки.

Для расчетов коэффициента K_{TC} принимаем, что он является линейным на интервале управления от 30° до 90° , тогда за значения угла возьмем середину интервала $\alpha \in [30^\circ \dots 90^\circ]$, подставив значение в (*) получим:

$$K_{TC} = \frac{3\sqrt{3} U_d \cos \alpha}{\pi \alpha} = \frac{3\sqrt{3} 950 \cos 60^\circ}{\pi \frac{\pi}{3}} = 750,23.$$

Таким образом, передаточную функцию тиристорного преобразователя можно представить в следующем виде:

$$W_{TC} = \frac{K_{TC}}{T_{TC}s + 1} = \frac{750,23}{0,00167s + 1}.$$

В схеме источника питания 4 тиристорных преобразователя включены параллельно. Между парами тиристорных преобразователей TC2.1-TC2.2 и TC2.3-TC2.4 существует фазовый сдвиг 30 эл. град., что увеличивает общую пульсность системы тиристорных преобразователей до 12-ти. С учетом этого передаточная функция четырех параллельно включенных преобразователей имеет вид:

$$W_{PS}(s) = W_{TCpar}(s) = \frac{K_{TC}}{\frac{1}{2}T_{TC}s + 1}.$$

В итоге получаем передаточную функцию источника питания, управляющего током тороидальной обмотки:

$$W_{PS}(s) = \frac{K_{TC}}{\frac{1}{2}T_{TC}s + 1} = \frac{750,23}{\frac{1}{2} \cdot 0,00167s + 1} = \frac{750,23}{0,000835s + 1}.$$

Реализация контура управления током тороидальной обмотки в среде Simulink пакета Matlab

Система управления током тороидальной обмотки является двухконтурной, состоящей из контура управления током тороидальной обмотки и контура стабилизации напряжения на выходе источника питания. Схема системы, собранная в среде Simulink пакета Matlab, представлена на рис. 5.

Блоки регуляторов «PI zerohold» были получены путем добавления к стандартному блоку «Discrete PI Controller» экстраполятора нулевого

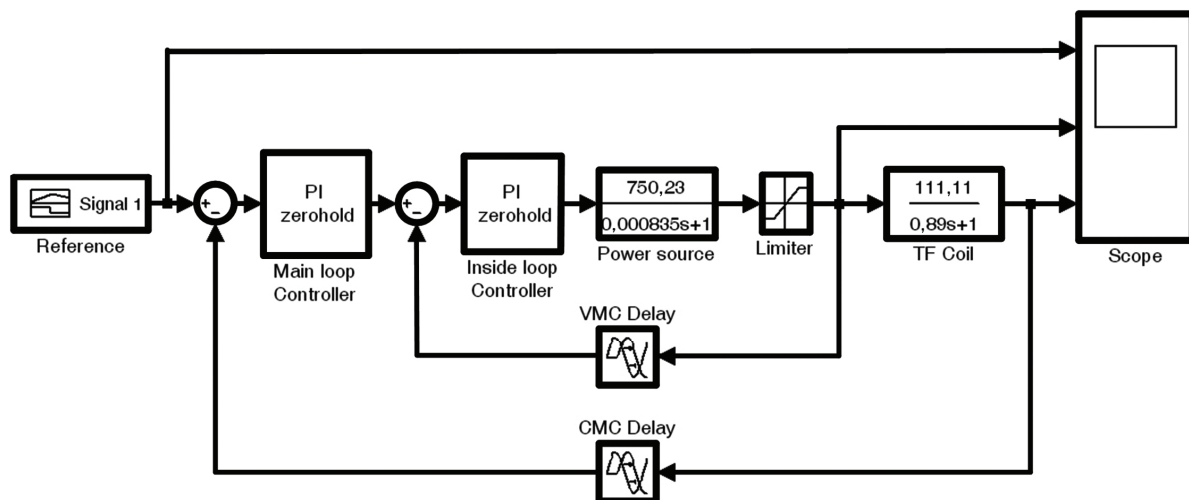


Рис. 5. Схема контура управления током обмотки тороидального поля

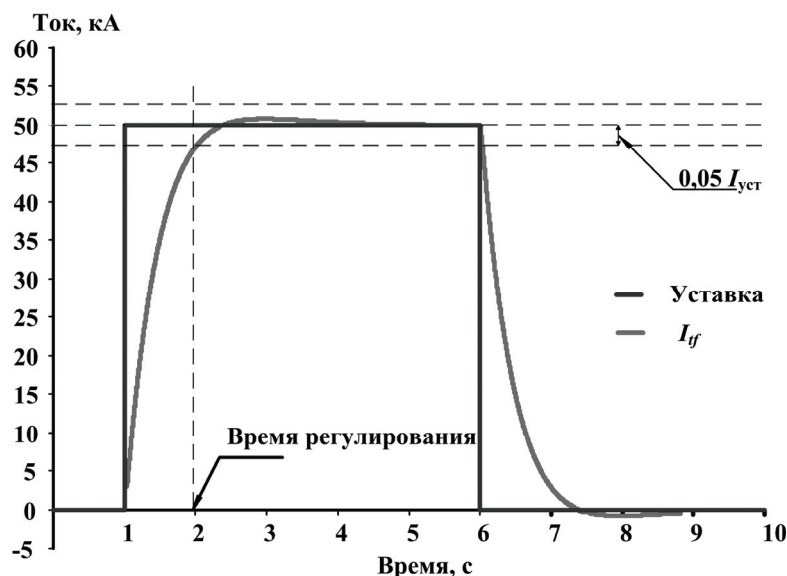


Рис. 6. Переходный процесс при моделировании: $I_{\text{т}}$ — ток тороидальной обмотки, $I_{\text{уст}}$ — установившееся значение тока

порядка, для моделирования работы реального дискретного регулятора. Блоки «VMC Delay» и «CMC Delay» вводят задержку, соответствующую времени обработки сигналов.

Определение параметров настройки регуляторов контура управления током тороидальной обмотки

Традиционная методика определения параметров настройки регуляторов каскадных двухконтурных систем регулирования базируется на возможности последовательного расчета контуров.

Для определения параметров настройки регуляторов был использован инструментальный пакет «Nonlinear Control Design Blockset» (NCD-Blockset). Процедура определения параметров настройки регулятора сводится к заданию ограничений, на базе которых «NCD-Blockset» автоматически генерирует задачу конечномерной оптимизации так, чтобы точка экстремума в пространстве настраиваемых параметров соответствовала выполнению всех требований, предъявляемых к качеству процесса. Эта задача решается с привлечением специализированной процедуры квадратичного программирования из пакета «Optimization Toolbox».

Полученные параметры настройки регулятора контура стабилизации напряжения ИП: $K_p=0,000332$, $T_u=0,01$. Параметры настройки регу-

лятора контура управления током тороидальной обмотки: $K_p=0,018$, $T_u=0,72$.

Эксперимент с разработанной моделью

Для проверки результатов расчета настроек регуляторов на модель было подано скачкообразное воздействие амплитудой 50 кА, что соответствует рабочему значению тока в тороидальной обмотке, рис. 6.

Прямые показатели качества переходного процесса составили: время регулирования $t_{\text{рег}} = 0,98$ с; перерегулирование $\sigma = 1,9\%$.

Выводы

1. Спроектирован контур управления током тороидальной обмотки токамака КТМ, разработана его структурная схема, создана имитационная модель в среде Simulink пакета Matlab.
2. Рассчитаны передаточные функции звеньев и параметры настройки регуляторов, входящих в состав контура управления током тороидальной обмотки.
3. Эксперимент с разработанной моделью показал, что переходный процесс тока в тороидальной обмотке управления при подаче скачкообразного управляющего воздействия удовлетворяет условиям, поставленным при проектировании.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ясельский В.К., Байструков К.И., Павлов В.М и др. Система управления плазмой термоядерной установки КТМ // Известия Томского политехнического университета. — 2002. — Т. 305. — № 3. — С. 383-398.

2. Беркович Е.И., Ковалев В.Н. и др. Полупроводниковые выпрямители / под ред. Ф.И. Ковалева и Г.П. Мостковой. — 2-е изд., переработ. — М.: Энергия, 1978. — 448 с.: ил.

Поступила 22.03.2010 г.