

ЯДЕРНЫЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ, ВКЛЮЧАЯ ПРОЕКТИРОВАНИЕ, ЭКСПЛУАТАЦИЮ И ВЫВОД ИЗ ЭКСПЛУАТАЦИИ (05.14.03)

УДК 621.314.58

DOI: 10.24160/1993-6982-2021-1-32-38

О создании системы управления вертикальным положением плазмы в Токамаке КТМ

С.В. Котов, В.М. Павлов, Д.Б. Зарва

Вводимая в эксплуатацию в г. Курчатова (Казахстан) установка Токамак КТМ с аспектным отношением $A = 2$ и током плазмы порядка 750 кА будет способна создавать на испытуемых образцах материалов тепловые нагрузки, характерные для установки ИТЭР, при этом длительность импульса плазмы, благодаря дополнительному ВЧ-нагреву плазмы, достигнет порядка 4 с.

Один из этапов данной работы — исследования, направленные на получение эффективной системы управления вертикальным положением плазмы. Система включает в себя специальные обмотки быстрого управления, расположенные между тороидальной обмоткой и внутренней камерой, а также быстродействующий источник питания с обратной связью. В настоящее время смонтирована внутренняя камера токамака со всеми основными системами и обмотками, получен плазменный разряд в лимитерной конфигурации длительностью порядка 100 мс. Для работы системы управления вертикальным положением плазмы спроектирован и собран собственный источник питания, состоящий из последовательно подключенных тиристорного выпрямителя и управляемого инвертора напряжения на базе IGBT-транзисторов, имеющий значительный запас по мощности и быстродействию.

Проведены предварительные расчетные эксперименты в среде MATLAB, подтверждающие эффективность выбранного источника питания и системы сброса запасенной в обмотках энергии на водоохлаждаемое балластное сопротивление.

По мере введения в эксплуатацию остальных систем токамака и получения первых экспериментальных данных о характеристиках движения плазмы в диверторной конфигурации планируется проведение серии программных экспериментов, направленных на создание и оптимизацию алгоритма регулятора системы обратной связи в источнике питания обмоток быстрого управления токамака КТМ.

Ключевые слова: токамак КТМ, плазма, обмотки быстрого регулирования, выпрямитель, инвертор, регулятор.

Для цитирования: Котов С.В., Павлов В.М., Зарва Д.Б. О создании системы управления вертикальным положением плазмы в Токамаке КТМ // Вестник МЭИ. 2021. № 1. С. 32—38. DOI: 10.24160/1993-6982-2021-1-32-38.

Designing the Plasma Vertical Position Control System in the KTM Tokamak

S.V. Kotov, V.M. Pavlov, D.B. Zarva

The Tokamak KTM plant with the aspect ratio of $A = 2$ and a plasma current of around 750 kA, which is being put into operation in Kurchatov (Kazakhstan), will be able to produce heat loads on the tested samples of materials that are characteristic of the ITER plant, and owing to additional HF heating the plasma pulse duration will reach about 4 s. One of the stages of this work involves studies aimed at obtaining an efficient plasma vertical position control system. The system includes special fast control windings located between the toroidal winding and the inner chamber, and also a fast-acting power supply with feedback. Currently, the tokamak inner chamber with all main systems and windings has been assembled, and a plasma discharge with duration of about 100 ms has been obtained in the limiter configuration. To support operation of the plasma vertical position control system, an own power supply has been designed and assembled, which consists of a thyristor rectifier connected in series with a controlled voltage inverter on IGBT transistors, which has a significant margin in power and response speed.

Preliminary computation experiments were carried out in the MATLAB environment, which have confirmed the adequacy of the selected power supply and the system for discharging the energy stored in the windings to the water-cooled ballast resistance.

With the remaining tokamak systems having sequentially been put into operation and the first experimental data on plasma motion characteristics in the divertor configuration having become available, it is planned to carry out a series of program experiments aimed at developing and optimizing the feedback system controller algorithm in the power supply of the KTM tokamak fast control windings.

Key words: KTM tokamak, plasma, fast control windings, rectifier, inverter, controller.

For citation: Kotov S.V., Pavlov V.M., Zarva D.B. Designing the Plasma Vertical Position Control System in the KTM Tokamak. Bulletin of MPEI. 2021;1:32—38. (in Russian). DOI: 10.24160/1993-6982-2021-1-32-38.

Введение

Комплекс Токамак КТМ (рис. 1), имеющий непосредственное отношение к реализации международного проекта ITER (Международный экспериментальный термоядерный реактор), в настоящее время вводится в эксплуатацию на территории г. Курчатов Республики Казахстан. Уникальность установки состоит в возможности проведения серий испытаний образцов кандидатов материалов удельными тепловыми потоками, характерными для ITER, при сохранении герметичности внутренней камеры в процессе их загрузки и извлечения [1 — 4]. Применение системы дополнительного высокочастотного разогрева доводит длительность импульсов плазмы до 4 с, в связи с чем особую важность приобретает эффективность и надежность работы системы управления положением плазмы.

На первых токамаках основная задача управления заключалась в стабилизации положения плазменного шнура по большому радиусу посредством полоидального магнитного поля. На современных установках используется комбинация программного управления, необходимого для обеспечения сценария пробоя и удержания плазмы, и системы обратной связи, позволяющей компенсировать неустойчивость вертикального положения плазмы [5].

Вертикальная неустойчивость является следствием стремления к повышению эффективности токамаков, возможного при увеличении плотности плазмы, для чего сечение плазменного шнура вытягивают в вертикальной плоскости с помощью соответствующих полоидальных обмоток. В сравнении с круглой конфигурацией вытянутая плазма позволяет достигать значительно большего давления при той же индукции магнитного поля, но при подобной конфигурации малые смещения плазмы по вертикали приводят к увеличению действующих в этом направлении сил Ампера, и плазма становится вертикально неустойчивой. Поэтому, для работы токамаков с вытянутой плазмой необходима система управления с обратной связью, стабилизирующая положение плазмы или снижающая скорость вертикального движения плазмы.

Опишем динамику вертикальных перемещений плазмы совместно с обмоткой управления следующими уравнениями:

$$\begin{aligned} \dot{Z}(t) &= \gamma Z(t) + b[I(t) + W(t)]; \\ LI(t) &= U(t) - RI(t), \end{aligned}$$

где $Z(t)$ — смещение плазмы по вертикали, м; $I(t)$ — ток обмотки управления, А; $W(t)$ — аддитивное возмущение, выраженное в единицах тока обмотки управления; b — динамическая эффективность обмотки управления, м/(с·А); γ — инкремент неустойчивости вертикальных перемещений плазменного шнура, с⁻¹; L , R — индуктивность и активное сопротивление обмоток управления, Гн, Ом; $U(t)$ — напряжение на обмотке управления, В.

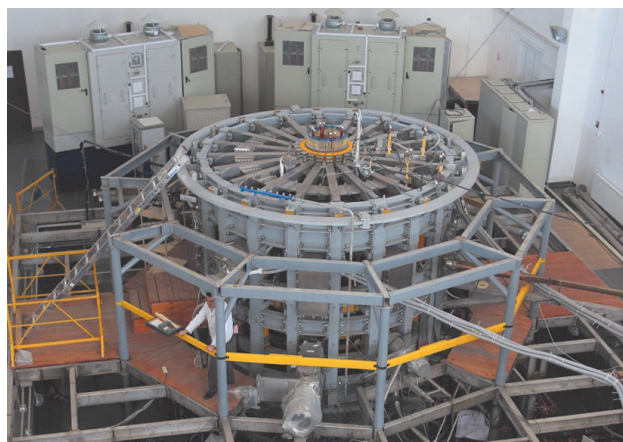


Рис. 1. Внешний вид установки КТМ

Оценочное значение инкремента неустойчивости плазмы для токамака КТМ с учетом компенсации вертикальной неустойчивости витками пассивной стабилизации равно 300 с⁻¹ [6].

Требуемая точность стабилизации положения плазмы, при которой $Z(t)$ не стремится к бесконечности — 2...4% от малого радиуса плазмы, что для токамака КТМ составляет 1...2 см [7].

Использование основной системы электропитания полоидальных обмоток PF1-PF6 для стабилизации плазмы с вытянутым сечением невозможно из-за относительно медленного времени переключения используемых в ней тиристоров по сравнению со скоростью вертикального ухода плазмы. Управление полоидальными обмотками обеспечивает равновесие и необходимую форму плазмы при ее медленных вертикальных смещениях, а при быстром смещении плазмы следует брать отдельные обмотки, подключенные к быстродействующему источнику питания.

Стабилизацию вертикального положения плазменного шнура в Токамаке КТМ обеспечивают специальные обмотки быстрого регулирования (НФС), позволяющие изменять горизонтальное магнитное поле в зоне расположения плазмы (таблица). Они расположены между тороидальной обмоткой и внутренней камерой, включены электрически последовательно, а магнитно — встречно, при этом ток в верхней катушке протекает в одном направлении с током плазмы, а в нижней — в обратном. Таким образом, силы, воздействующие на плазму со стороны данных обмоток, будут направлены в одну сторону, что позволит обеспечить стабилизацию быстрых смещений плазмы по вертикали (рис. 2).

Параметры электрической системы питания обмоток НФС

Для обеспечения быстродействия управляемого источника питания обмоток НФС на токамаке КТМ применена комбинация из последовательно соединенных выпрямителя, имеющего на выходе постоянные 1000 В при токах нагрузки до 7000 А, и однофазного инвер-

Основные характеристики обмоток НФС и РF электромагнитной системы Токамака КТМ

Обмотка	Число витков	Активное сопротивление, мОм	Индуктивность, мГн	$U_{max}, U_{min}, В$	Максимальный ток, кА
НФС	72	212,5	17,6	± 1000	3
PF1	40	9,150	2,60	± 1000	18
PF2	8	3,960	0,37	± 1000	18
PF3	40	25,97	11,0	± 1000	10
PF4	48	6,720	3,10	± 1000	30
PF5	16	7,820	1,40	± 1000	30
PF6	40	25,88	11,1	± 1000	10

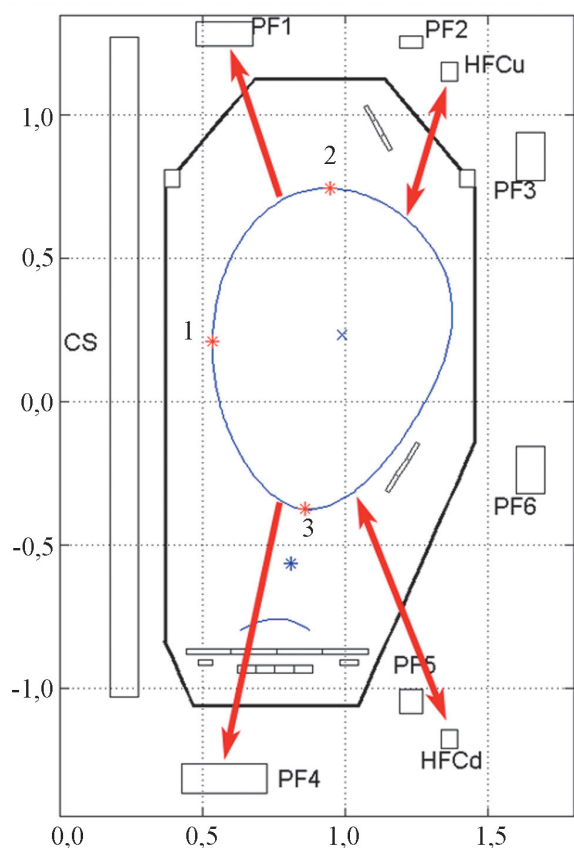


Рис. 2. Расположение основных обмоток в Токамаке КТМ. Силы, действующие на плазму со стороны отвечающих за растяжение обмоток PF1, PF4 и обмотки управления вертикальным положением НФС.

тора напряжения при двухполюсной нагрузке, работающего в режиме широтно-импульсной модуляции (ШИМ). Такая схема позволяет формировать на активно-индуктивной нагрузке три уровня выпрямленного напряжения с любым заданным средним значением в диапазоне от -1000 до 1000 В.

Выпрямитель обмотки НФС состоит из двух последовательно включенных, управляемых тиристорных преобразователей, построенных по 6-пульсной схеме с защитой от перенапряжений и перегрузки по току и разработанных по аналогии с ранее созданными универсальными тиристорными преобразователями

(УТП), питающими основные катушки Токамака КТМ [8]. Применение управляемого выпрямителя позволяет отключать катодные группы вентилях трехфазного выпрямительного моста, что дает возможность снижать максимальный ток во время предварительного заряда фильтрующих емкостей инвертора.

Питается выпрямитель от согласующего трехобмоточного трансформатора анодного питания мощностью $6,3$ МВА, понижающего напряжение с $\sim 10,5$ кВ до ~ 320 В. Трансформатор обладает возможностью регулирования напряжения вентильных обмоток посредством встроенного регулятора (РПН), что необходимо для предварительной корректировки амплитудного значения напряжения на выходе выпрямителя.

Инвертор управляется посредством ШИМ, при этом нет необходимости моделирования сложной кривой напряжения на выходе, что снижает требования к его частоте. В данном случае выбрана удвоенная желаемая частота изменения напряжения на выходе, т. е. при 1000 Гц изменения напряжения частота ШИМ — 2000 Гц.

Для обеспечения требуемых мощности и быстродействия контура в инверторе решено использовать высокоэффективные интеллектуальные IGBT-модули SEMIKRON-4DUFW в количестве 12 шт.

Конструктивно модуль представляет собой 4 полумоста на IGBT-транзисторах (с шунтированием антипараллельными диодами) с интегрированным драйвером и подключенным к нему оптическим преобразователем (рис. 3). Указанная конструкция располагается на отдельном жидкостном охладителе, имеет

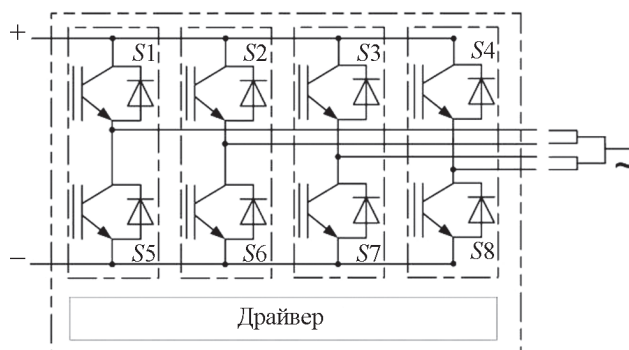


Рис. 3. Структурная схема модуля SEMIKRON SKiiP

собственный специализированный блок фильтрующих конденсаторов общей емкостью 6300 мкФ на один модуль (75600 мкФ — для всего инвертора) со стороны выпрямленного напряжения и набор высокочастотных снабберных конденсаторов емкостью 220 нФ, необходимых для защиты модуля от коммутационных перенапряжений, возникающих из-за паразитных индуктивностей конструкции с емкостями.

Встроенный в модуль SKiIP драйвер выполняет все функции, необходимые для безопасной работы, проводя постоянный мониторинг выходного тока, напряжения силовой шины питания и температуры модуля. Драйверы модулей имеют аналоговые выходы, сигналы на которых пропорциональны току, температуре модуля или напряжению силовой шины питания. Сигналы поступают на управляющий процессор и могут быть использованы для анализа состояния системы. Наличие интегрированного драйвера, выполняющего функции мониторинга и защиты, значительно упрощает подключение IGBT-модуля в схему управления, а оптоэлектронный преобразователь решает проблему синхронного управления и помехозащищенности сигнала.

Помимо однофазного инвертора напряжения, к выходу выпрямителя подключена защита от перенапряжений со стороны нагрузки на встречно-параллельных тиристорах с балластным сопротивлением, ограничивающая напряжение до допустимых пределов в случае наведения посторонних токов в обмотке или при каких-либо других внештатных ситуациях. Учитывая характер нагрузки и место эксплуатации инвертора, принятие подобных мер необходимо.

Излишки энергии, запасенные в обмотке НФС, решено сбрасывать на водоохлаждаемое балластное сопротивление, коммутируемое со стороны питания инвертора двумя модулями на IGBT-транзисторах.

Моделирование режимов работы инвертора

Моделирование расчетных экспериментов проводилось в среде Simulink пакета MATLAB версии R2017a.

Для выбора номинала балластного сопротивления рассчитан наименее благоприятный сценарий (рис. 4, 5), при котором токи выпрямителя и обмотки НФС максимальны и равны 3000 А, что в момент коммутации даст суммарный ток 6000 А на конденсаторной батарее. По результатам вычислений значение разрядного сопротивления выбрано равным 0,4 Ом. Остаточная индуктивная энергия в обмотке НФС, которую необходимо рассеивать, составляет 66,78 кДж. Результаты моделирования показали, что ток в обмотке НФС снизится до нуля за ~37 мс, при этом на разрядном сопротивлении рассеется около 51,8 кДж энергии.

Для проверки работоспособности источника питания при заданных характеристиках элементов инвертором выполнены моделирование работы и отработка на модели режимов включения и отключения источника питания НФС (рис. 6). Для учета неустойчивости плазмы в модель добавлен блок с передаточной функцией плазмы [3]:

$$W(s) = 0,1/(s - 300)/$$

Модель состоит из силового блока, мостового инвертора напряжения, блока управления по методу ШИМ с несимметричным включением транзисторов и ПИД-регулятора.

Мостовой инвертор напряжения основан на блоке Universal Bridge, в который вошли 4 IGBT-транзистора с четырьмя шунтирующими диодами. Блок ШИМ реализует способ несимметричного управления.

Регулятор, установленный в модели, — универсален, т. е. с помощью разных настроек коэффициентов можно получить различное поведение системы. В нашем случае на первом этапе исследований взят ПИД-регулятор.

Результаты расчетных экспериментов доказывают соответствие параметров источника питания обмотки НФС требованиям, предъявляемым к обмоткам бы-

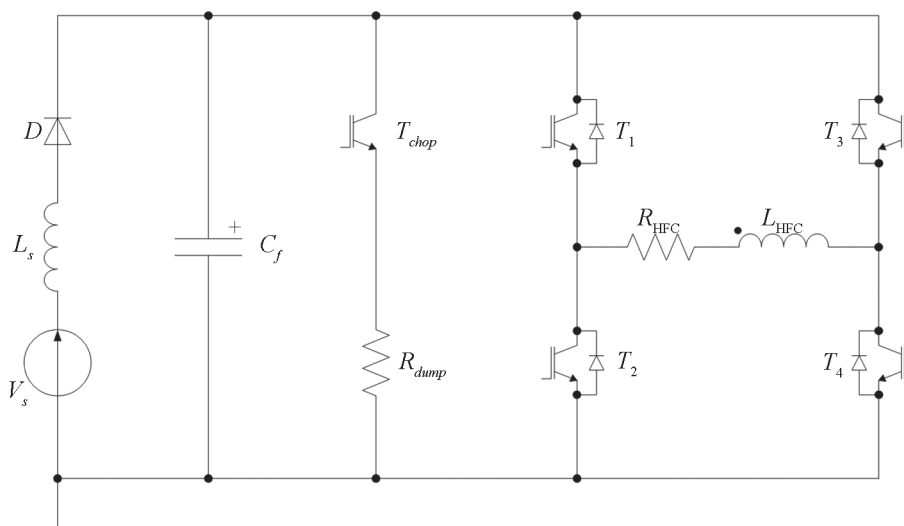


Рис. 4. Упрощенная схема источника питания НФС

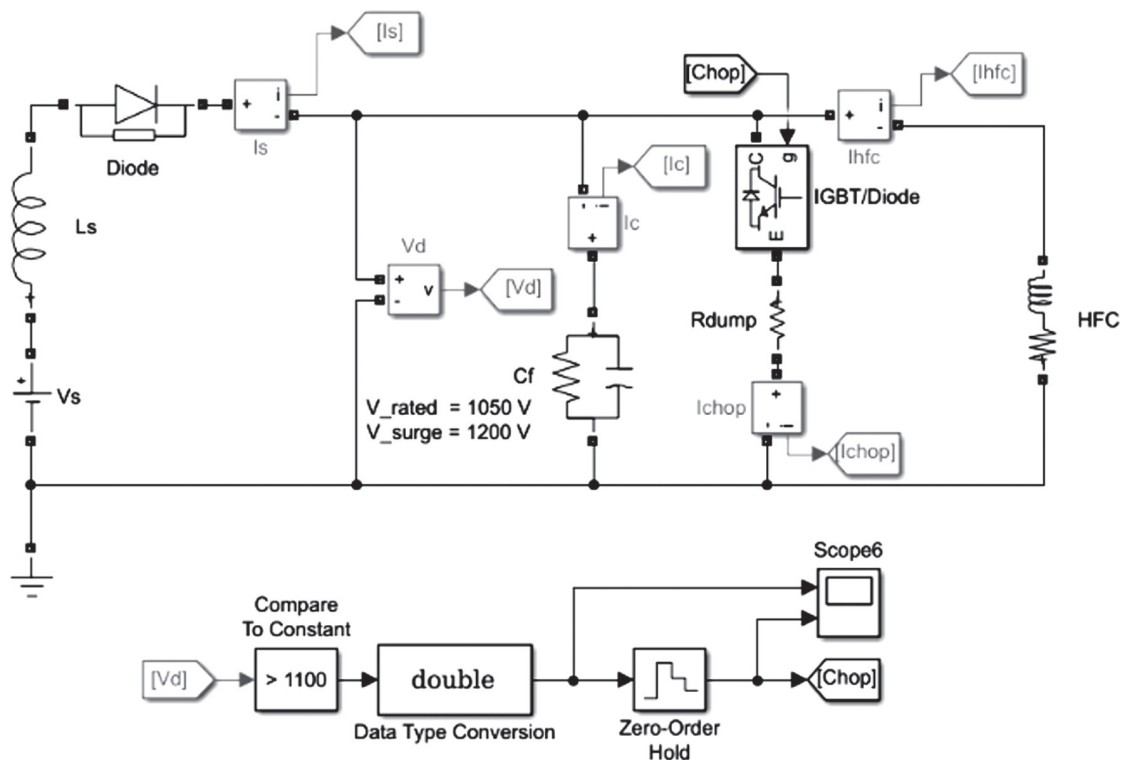


Рис. 5. Модель источника питания HFC

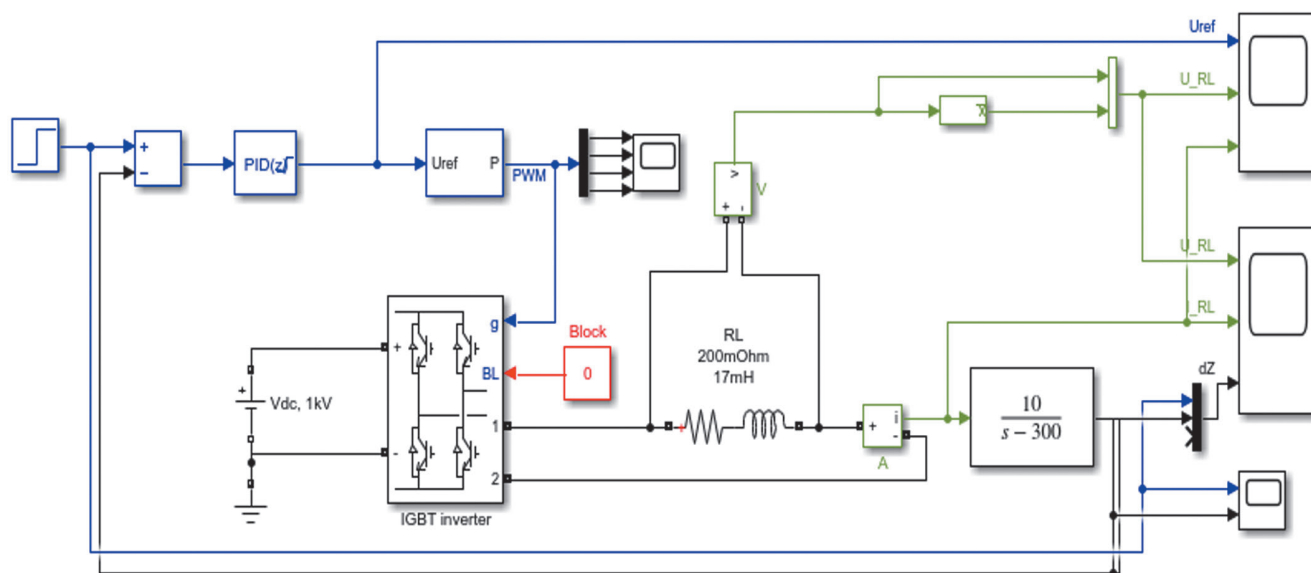


Рис. 6. Модель управления неустойчивой плазмой с использованием PID-регулятора

строго управления вертикальным положением плазмы [9]. В частности, инвертор позволяет устанавливать на выводах обмотки HFC напряжение в диапазоне $-1000...1000$ В за 1 мс. Скорость ввода тока составляет порядка 4...5 мс с момента срабатывания уставки по положению плазмы (рис. 7).

Одна из основных задач при наладке программной части системы — создание регулятора, способного одинаково эффективно стабилизировать вертикальное движение плазмы на всех фазах разряда (лимитерной,

диверторной), а также при последующем введении дополнительной ВЧ-мощности. Известно, что в абсолютном большинстве случаев использования регуляторов в промышленности, в том числе при термоядерных экспериментах, распространение получили классические линейные регуляторы типа ПИД [7]. Однако, их недостатком является устойчивость работы в достаточно узкой области варьирования параметров объекта.

Имеющиеся оценочные данные, в частности, по инкременту неустойчивости, непостоянны даже на

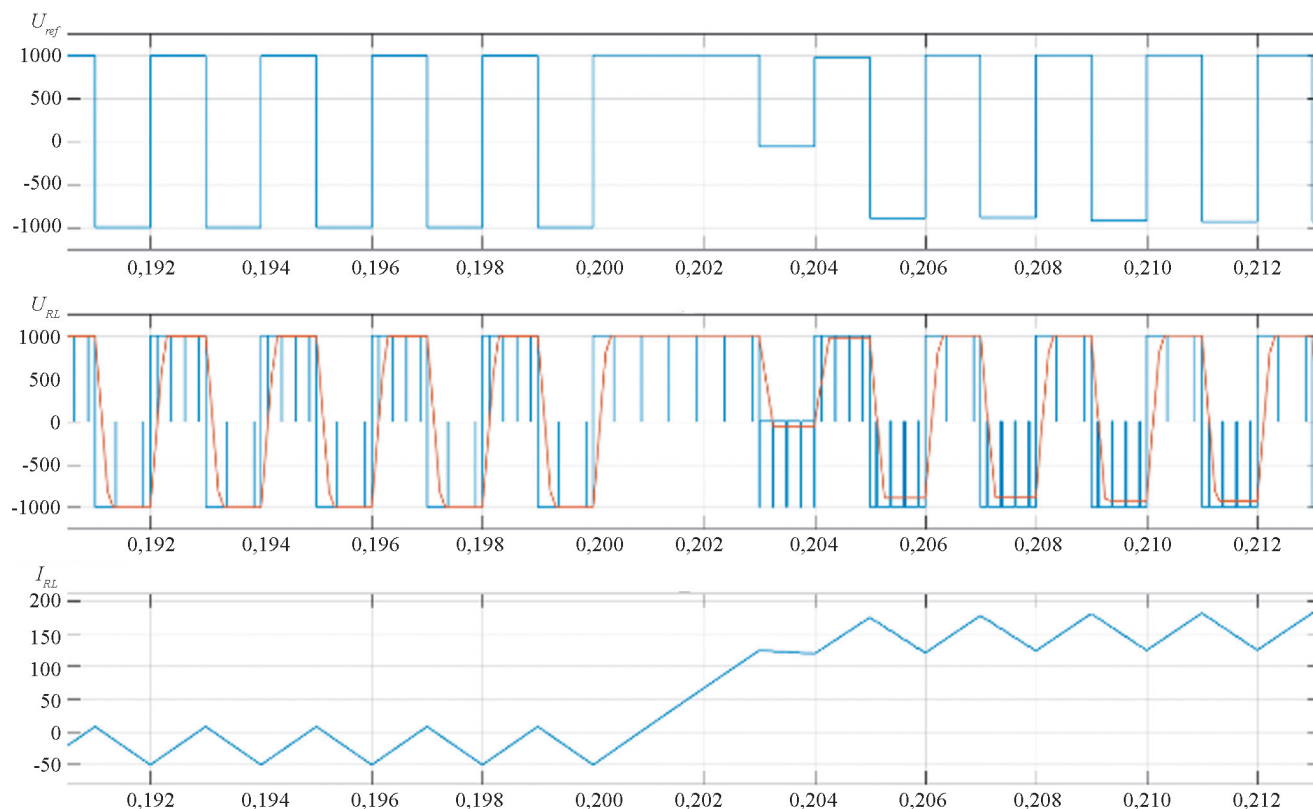


Рис. 7. Результаты моделирования ввода тока в обмотку НФС:

U_{ref} — напряжение, задаваемое регулятором; U_{RL} , I_{RL} — напряжение и изменение тока на нагрузке

протяжении одного разряда и требуют дальнейшей корректировки параметров регулятора в ходе реальных экспериментов на установке. Для такого рода объектов предлагается последующее изучение применения регуляторов с нечеткой логикой работы, менее чувствительных к изменению параметров.

Заключение

Для решения задачи вертикальной стабилизации плазмы на токамаке КТМ разработан и смонтирован источник питания обмотки НФС, состоящий из управляемого выпрямителя с двумя тиристорными преобразователями и инвертора напряжения на основе IGBT-модулей. После проведения необходимых испытаний оборудования и отработки методики определения положения плазмы на основе показаний имеющихся де-

текторов планируется создание алгоритма регулятора системы управления вертикальным положением плазмы токамака КТМ.

Для более достоверного моделирования регулятора следует иметь экспериментальные данные о характере движения плазмы по вертикали в токамаке в диверторной конфигурации плазмы.

После получения первых экспериментальных данных о динамике плазмы и создании на их основе достоверной модели движения плазмы по вертикали камеры Токамака КТМ необходимо провести оценку области управления системы питания НФС. При необходимости выполнить оптимизацию, исходя из имеющихся возможностей по части источника питания и изначально заложенных проектом геометрических параметров Токамака КТМ.

Литература

1. Азизов Э.А. и др. Казахстанский материаловедческий токамак КТМ и вопросы термоядерного синтеза. Алматы, 2006.
2. Назарбаев Н.А. и др. Проведение комплекса научно-технических и инженерных работ по приведению бывшего Семипалатинского испытательного полигона в безопасное состояние. Курчатов: РГП «Национальный ядерный центр РК», 2016. С. 35—60.

References

1. Azizov E.A. i dr. Kazakhstanskiy Materialovedcheskiy Tokamak KTM i Voprosy Termoyadernogo Sinteza. Almaty, 2006. (in Russian).
2. Nazarbaev N.A. i dr. Provedenie Kompleksa Nauchno-tekhnicheskikh i Inzhenernykh Rabot po Privedeniyu Byvshego Semipalatinskogo Ispytatel'nogo Poligona v Bezopasnoe Sostoyanie. Kurchatov: RGP «Natsional'nyy Yadernyy Tsentr RK», 2016:35—60. (in Russian).

3. **Tazhibaeva I.L. e. a.** KTM Experimental Complex Project Status // Fusion Sci. and Techn. 2005. V. 47. No. 3. Pp. 746—750.

4. **Докука В.Н., Хайрутдинов Р.Р., Кавин А.А.** Синтез и моделирование системы магнитного управления плазмой в токамаке КТМ // Вопросы атомной науки и техники. Серия «Термоядерный синтез». 2008. Вып. 1. С. 12—25.

5. **Митришкин Ю.В. и др.** Управление плазмой в токамаках. Ч. 2. Системы магнитного управления плазмой // Проблемы управления. 2018. № 2. С. 2—30.

6. **Велихов Е.П., Азизов Э.А., Тихомиров Л.Н.** Казахстанский материаловедческий токамак. М.: ИЦ «Сфератек», 2001.

7. **Митришкин Ю.В., Карцев Н.М., Зенков С.М.** Стабилизация неустойчивого вертикального положения плазмы в токамаке Т-15 // Автоматика и телемеханика. 2014. Вып. 2. С. 129—145.

8. **Зарва Д.Б. и др.** Электротехнический комплекс системы импульсного электропитания токамака КТМ // Вопросы атомной науки и техники. Серия «Термоядерный синтез». 2018. Т. 41. Вып. 2. С. 59—70.

9. **Качкин А.Г., Павлов В.М.** Информационное и алгоритмическое обеспечение блока диагностики системы управления источниками питания обмоток полоидального поля токамака КТМ // Известия Томского политехн. ун-та. 2009. Т. 314. № 5. С. 58—62.

3. **Tazhibaeva I.L. e. a.** KTM Experimental Complex Project Status. Fusion Sci. and Techn. 2005;47;3: 746—750.

4. **Dokuka V.N., Khayrutdinov R.R., Kavin A.A.** Sintez i Modelirovanie Sistemy Magnitnogo Upravleniya Plazmoy v Tokamake KTM. Voprosy Atomnoy Nauki i Tekhniki. Seriya «Termoyadernyy Sintez». 2008;1:12—25. (in Russian).

5. **Mitrishkin Yu.V. i dr.** Upravlenie Plazmoy v Tokamakakh. Ch. 2. Sistemy Magnitnogo Upravleniya Plazmoy. Problemy Upravleniya. 2018;2:2—30. (in Russian).

6. **Velikhov E.P., Azizov E.A., Tikhomirov L.N.** Kazakhstanskiy Materialovedcheskiy Tokamak. M.: ITS «Sferatek», 2001. (in Russian).

7. **Mitrishkin Yu.V., Kartsev N.M., Zenkov S.M.** Stabilizatsiya Neustoychivogo Vertikal'nogo Polozheniya Plazmy v Tokamake T-15. Avtomatika i Telemekhanika. 2014;2:129—145. (in Russian).

8. **Zarva D.B. i dr.** Elektrotekhnicheskiy Kompleks Sistemy Impul'snogo Elektropitaniya Tokamaka KTM. Voprosy Atomnoy Nauki i Tekhniki. Seriya «Termoyadernyy Sintez». 2018;41;2:59—70. (in Russian).

9. **Kachkin A.G., Pavlov V.M.** Informatsionnoe i Algoritmicheskoe Obespechenie Bloka Diagnostiki Sistemy Upravleniya Istochnikami Pitaniya Obmotok Poloidal'nogo Poly Tokamaka KTM. Izvestiya Tomskogo Politekhn. Unta. 2009;314;5:58—62. (in Russian).

Сведения об авторах:

Котов Сергей Владимирович — аспирант отделения ядерно-топливного цикла инженерной школы ядерных технологий Томского политехнического университета, e-mail: ksvlondon@mail.ru

Павлов Вадим Михайлович — кандидат технических наук, доцент отделения ядерно-топливного цикла Томского политехнического университета, e-mail: pavlov@tpu.ru

Зарва Денис Борисович — заместитель главного инженера Национального ядерного центра Республики Казахстан, e-mail: zarva@nnc.kz

Information about authors:

Kotov Sergey V. — Ph.D.-student of Nuclear Fuel Cycle Dept. of the Engineering School of Nuclear Technologies, Tomsk Polytechnic University, e-mail: ksvlondon@mail.ru

Pavlov Vadim M. — Ph.D. (Techn.), Assistant Professor of Nuclear Fuel Cycle Dept., Tomsk Polytechnic University, e-mail: pavlov@tpu.ru

Zarva Denis B. — Deputy Chief Engineer of the National Nuclear Center of the Republic of Kazakhstan, e-mail: zarva@nnc.kz

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов

Conflict of interests: the authors declare no conflict of interest

Статья поступила в редакцию: 06.04.2020

The article received to the editor: 06.04.2020