Система управления положением плазменного шнура на токамаке ФТ-2

© А.А. Богданов[1], Ю.В. Тубольцев[1], Ю.В. Чичагов[1], Н.А. Жубр[1], М.Ю. Кантор[1], Л.А. Есипов[1], С.В. Шаталин[1], В.М. Завадский[1], В.П. Лазутков[1], С.В. Завадский[2]

[1] ФТИ им. А.Ф. Иоффе, Санкт-Петербург, Россия
[2] Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия
E-mail: Alexander.A.Bogdanov@mail.ioffe.ru

Поступило в Редакцию 4 мая 2025 г.
В окончательной редакции 27 июня 2025 г.
Принято к публикации 30 июня 2025 г.

Разработана новая модульная система управления плазмой на современной элементной и компьютерной базе для токамака ФТ-2. Описываются устройство системы, принцип управления положением плазменного шнура при помощи тиристорных ключей и режимы работы установки. В апреле 2025 г. были проведены первые испытания токамака ФТ-2 с новой системой управления в режиме предварительно записанного сценария изменения тока в обмотках управления. Испытания доказали работоспособность и перспективность развития установки в направлении внедрения автоматического режима удержания плазмы.

Ключевые слова: токамак, плазма, система управления, ФТ-2.

DOI: 10.61011/PJTF.2025.23.61670.7844

Одним из перспективных направлений экологически чистой энергетики является разработка реактора термоядерного синтеза на основе установки токамак, в которой тороидальная плазма удерживается сильным магнитным полем [1]. Положение и перемещение плазменного шнура в поперечном сечении токамака определяются комплексом физических факторов и обычно являются предметом оптимизации и динамического управления в процессе разряда [2]. Во многих случаях при отсутствии правильно настроенных корректирующих воздействий на положение шнура разряд в токамаке слишком быстро теряет устойчивость или не зажигается вовсе. Для управления положением плазменного шнура в малых токамаках применяются обмотки корректирующего вертикального и горизонтального магнитного поля, токи в которых задаются по предварительной программе или определяются алгоритмом автоматического управления с обратными связями, в том числе с возможностью быстрых изменений управляющего воздействия.

На малом токамаке ФТ-2 ($a = 8$ cm, $R = 55$ cm, разряд до 40 ms, магнитное поле до 2.5 T) ведутся эксперименты [3] в режимах омического разряда, а также в режимах генерации тока и нагрева плазмы нижнегибридными волнами, когда параметры разряда могут существенно меняться в течение нескольких миллисекунд.

Для управления положением плазмы применяются три полоидальные токовые обмотки, условно именуемые R, H и B. Обмотка R смещает шнур по большому радиусу внутрь, обмотка H смещает шнур по большому радиусу наружу, а обмотка B — вниз. При этом управляемое смещение плазменного шнура вверх не требуется, так как шнур сам смещается в этом направлении в отсутствие управления. Обмотки подключаются к конденсаторной батарее (capacitor bank) набором из 38 тиристорных ключей с балластными резисторами, определяющими полный ток обмотки. Схема тиристорного ключа приведена на рис. 1.

Каждый ключ открывается коротким импульсом от блокинг-генератора, поступающим на управляющие электроды тиристоров T_1 и T_2. Тиристор T_2 подключает конденсаторную батарею к обмотке L. При этом емкость C в ключе заряжается через тиристор T_1. Для закрытия ключа подается короткий импульс от блокинг-генератора на управляющий электрод тиристора T_3, который подключает заряженную емкость C встречно к тиристору T_2, запирая его.

В ключах используются тиристоры четырех типов: ТЧ-25, ТЧ-80, ТЧ-125 и ТБ-400, которые обеспечивают импульсные токи коммутации от 10 до 1000 A. Времена нарастания и спада тока в обмотках составляют около 0.5 ms и определяются сопротивлениями R_1, R_2 и емкостью C.

Ранее на токамаке ФТ-2 для управления тиристорными ключами применялась система управления [4], выполненная из дискретных логических компонентов низкой степени интеграции, неспециализированного компьютера архитектуры x86 и неспециализированного контроллера аналого-цифрового преобразователя на базе шины ISA. Система показала определенную работоспособность, однако имела ряд значительных недостатков. В частности, использование большого количества дискретных компонентов привело к неудовлетворительной надежности, отсутствовала возможность перераспределения задач между логическим автоматом и процессором x86 для оптимизации алгоритмов управления. Кроме того, дальнейшее обслуживание системы оказалось затруднено в связи с тем, что все примененные

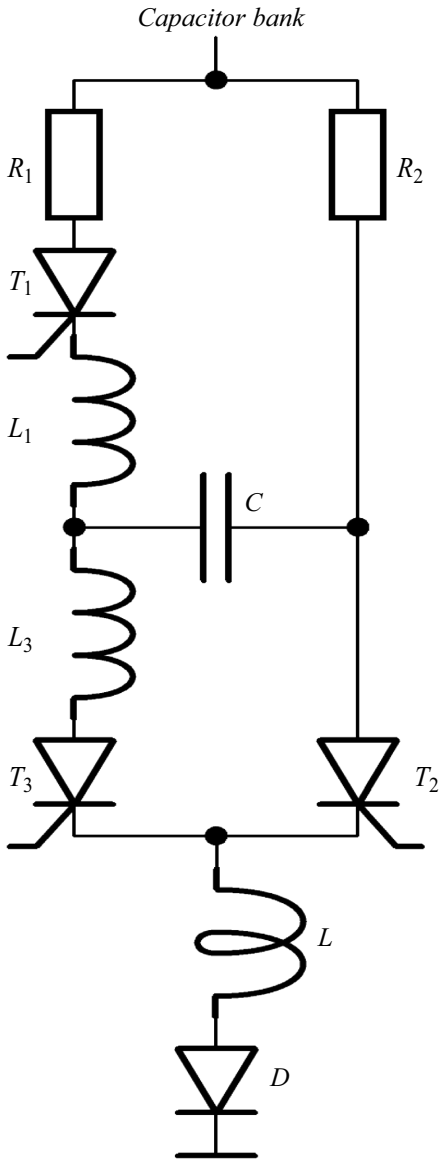

Рис. 1. Схема тиристорного ключа.

электронные компоненты к данному моменту сняты с производства и морально устарели.

В 2024–2025 гг. был разработан центр управления плазмой (ЦУП, Plasma control device) в виде обновленного модульного крейта, полностью интегрированного с основной системой сбора данных и управляемого через локальную сеть (рис. 2). В общей сложности для открытия и закрытия ключей в заданные моменты времени реализованы независимое управление работой 96 тиристоров и контроль их текущего состояния, а также предусмотрена регистрация положения плазменного шнура и некоторых других параметров разряда.

Блокинг-генераторы (Blocking oscillators) запускаются от логического импульса напряжения длительностью $4\,\mu$s, что может приводить к ложному срабатыванию от помех в условиях работы токамака. Поэтому для передачи импульсов управления к блокинг-генераторам была выбрана помехоустойчивая схема с токовой петлей и гальванической развязкой через оптопару. Для этого были созданы 48 плат управления тиристорами (ПУТ, Thyristor control boards), каждая из которых управляет двумя блокинг-генераторами, т. е. двумя тиристорами.

В свою очередь в крейте ЦУП размещаются четыре модуля управления тиристорами (МУТ, Thyristor control modules), в каждом из которых содержатся 32 канала управления на переключателях тока. От модулей МУТ до плат ПУТ каждый сигнал управления передается по витой паре на расстояние до 4 m. В качестве кабелей был выбран стандартный кабель F/UTP cat.6 с четырьмя витыми парами и разъемами типа 8P8C. Таким образом, через один разъем и один кабель осуществляется управление четырьмя тиристорами. Всего четыре модуля МУТ позволяют управлять системой из 128 тиристоров, однако сейчас задействовано 96 из них, этим обеспечивается запас на расширение системы тиристорных ключей. Предельная частота установки состояния всех тиристоров без учета их собственного быстродействия составляет 230 kHz.

Контроль текущего состояния тиристорных ключей осуществляется путем съема сигнала с анода тиристора T_2 тиристорного ключа через резистивный делитель напряжения при помощи модуля анализа состояния ключей (АСК, Acknowledgment module). Модуль АСК состоит из 40 каналов, из которых задействовано 38. Каждый канал содержит компаратор с управляемым гистерезисом для установки нижнего и верхнего порогов срабатывания. Когда тиристор закрыт, напряжение на аноде тиристора приблизительно равно уровню заряда батареи и может достигать величины 400 V. В открытом состоянии уровень напряжения на аноде тиристора T_2 значительно уменьшается вследствие протекания тока через резистор R_2, отделяющий тиристор от батареи. Предварительно для повышения помехоустойчивости ширина гистерезиса для каждого канала установлена на 50 V, но в процессе работы или при замене отдельных тиристоров на другие типы величина гистерезиса может быть скорректирована индивидуально для каждого канала при помощи подстроечных потенциометров в обратных связях компараторов.

Таким образом, компаратор в модуле АСК может определить состояние тиристора. Нижний порог срабатывания регулируется программным образом при помощи цифрового потенциометра от 0 до 110 V. Ширина гистерезиса (положение верхнего порога относительно нижнего) для каждого канала устанавливается индивидуальным миниатюрным ручным потенциометром и по умолчанию составляет 50 V. Для сглаживания высокочастотных помех полоса пропускания каналов АСК ограничена фильтром нижних частот на величине около 3 kHz. Предельная частота опроса состояния ключей составляет 110 kHz.

Управление всеми модулями крейта ЦУП осуществляется по шине данных через кросс-плату при по-

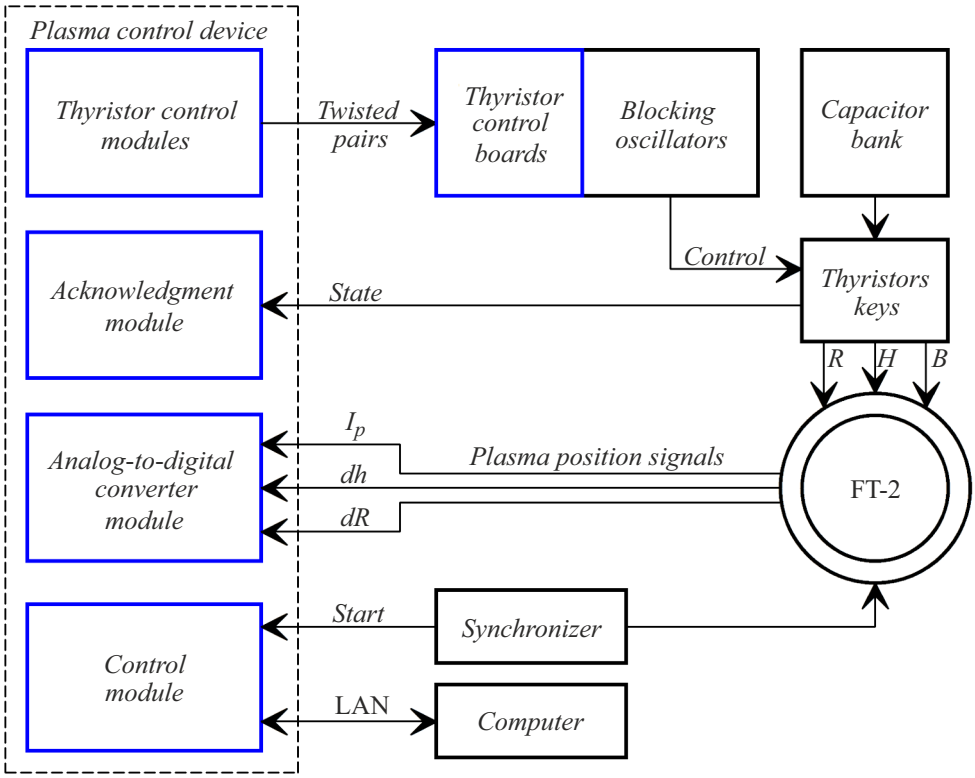

Рис. 2. Структурная схема центра управления плазмой и подключенных к нему систем токамака ФТ-2.

мощи модуля контроллера (Control module), который построен на базе одноплатного компьютера DE10-Nano. Центральным процессорным узлом является программируемая логическая матрица (Field-programmable gate array, FPGA) Cyclone V со встроенным 32-битным двухъядерным процессором Cortex-A9. Максимальная тактовая частота процессора Cortex-A9 составляет 900 MHz, а максимальная реализуемая тактовая частота FPGA составляет не менее 100 MHz, что обеспечивает достаточное быстродействие схем управления и измерения. Применение такого компонента позволяет в процессе проектирования системы отказаться от жесткого фиксирования алгоритма работы как логического автомата, так и управляющей программы и в дальнейшем перераспределять их роли по мере необходимости.

Одноплатный компьютер работает под управлением операционной системы OpenWrt, что обеспечивает широкий спектр средств программирования и удобство интеграции в локальную измерительную сеть.

Описанные выше модули позволяют организовать разряд плазмы токамака ФТ-2 по заранее записанному сценарию включения токов в его управляющих обмотках. Иными словами, оператор составляет таблицу из трех значений токов через обмотки (R, H и B) и временно́й задержки, которую необходимо выдержать перед переходом на следующую строку таблицы, т. е. на следующие величины токов. Далее при активации синхронизатора всей системы импульсы запуска подаются на ЦУП и другие устройства ФТ-2. ЦУП отрабатывает заложенный в него сценарий токов в обмотках и сохраняет в памяти данные о состоянии тиристорных ключей.

Такой предпрограммный режим управления разрядом хорошо работает, когда плазменный шнур стабилизируется медными пластинами, установленными вблизи стенок вакуумной камеры токамака. В модернизированном токамаке ФТ-2 при установке камеры большего размера такая пассивная стабилизация станет невозможной или менее эффективной. В этом случае разряд токамака будет контролироваться с помощью обратных связей, предусмотренных в созданной системе управления.

Управление положением плазмы будет проводиться в тактовом режиме с минимальной длительностью такта 0.1 ms. В каждом такте задаются требуемые положения плазменного шнура. Для компенсации отклонений от заданных положений система управления вычисляет необходимые токи в обмотках управления. Вычисления проводятся по выбранному алгоритму с использованием динамики сигналов горизонтального dR и вертикального dh смещения плазменного шнура, измеряемых седловидными петлями в токамаке, а также тока плазмы I_p, определяемого поясом Роговского. Для записи сигналов используется четырехканальный модуль аналого-цифрового преобразователя (АЦП, Analog-to-digital converter module).

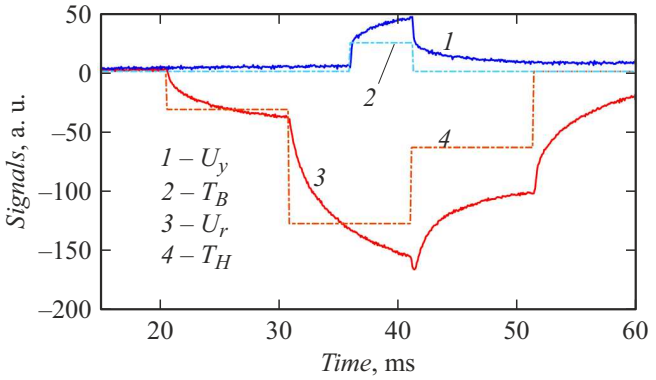

Рис. 3. Пример отработки заданного порядка включения тиристорных ключей и сигналы отклика с седловидных петель.

Каждый канал модуля АЦП содержит мультиплексор, схему управляемого смещения и масштабирования, фильтр низких частот и микросхему аналого-цифрового преобразователя. Мультиплексор позволяет подключить к каналу опорное напряжение для калибровки измерительного тракта без необходимости физического переключения разъемов. Схема смещения и масштабирования позволяет настроить функцию преобразования входного сигнала под диапазон микросхемы аналого-цифрового преобразователя.

Модуль АЦП позволяет одновременно оцифровывать четыре аналоговых сигнала с разрядностью 12 bit и частотой до 460 kHz. Каждый канал имеет фильтр нижних частот, обеспечивающий подавление высокочастотных помех и ограничивающий полосу пропускания на величине около 250 kHz. Схема смещения и масштабирования позволяет обеспечить входной диапазон напряжений сигналов от ± 1.5 до $+5$ V.

Режим работы системы с оцифровкой сигналов положения плазменного шнура и обратной связью через пропорционально-интегрально-дифференцирующий регулятор (ПИД-регулятор, PID-controller) [5,6], программно реализованный на FPGA модуля контроллера, предполагает реализацию автоматического поддержания положения плазмы в токамаке ФТ-2. Предварительное моделирование показывает, что частота работы тиристорных ключей для автоматического режима должна составлять не менее 2 kHz, а реализация подобного режима потребует тонкой настройки ПИД-регулятора.

В апреле 2025 г. установленная на токамаке ФТ-2 система управления была протестирована без плазмы и в стандартных режимах плазменного разряда. На рис. 3 показаны результаты испытания системы управления на токамаке ФТ-2 без плазмы. Линия *2* (T_B) показывает импульс управления тиристорными ключами группы *B*. На время этого импульса открывается набор тиристоров для создания заданного тока в обмотке вертикального равновесия, что отражается в сигнале седловидной петли U_y (линия *1*). Аналогичные сигналы для горизонтального управления положением плазменного шнура показаны линией *4* (T_H) и линией *3* (U_r).

На рис. 3 можно заметить существенное сглаживание отклика по фронту напряжения U_r, которое обусловлено бóльшим временем интегрирования сигналов с измерительной петли. В дальнейшем при работе системы с обратными связями скорость отклика будет увеличена.

В настоящее время разработанная система применяется для управления положением плазменного шнура во всех режимах разряда. Пример использования системы для управления разрядом с заданными временами включения и выключения токов в обмотках управления показан на рис. 4.

Осуществленный перевод системы управления плазмой на современную элементную и компьютерную базу позволил увеличить быстродействие, реализовать мониторинг состояния и расширить возможности для дальнейшего развития токамака ФТ-2. Проведенные в

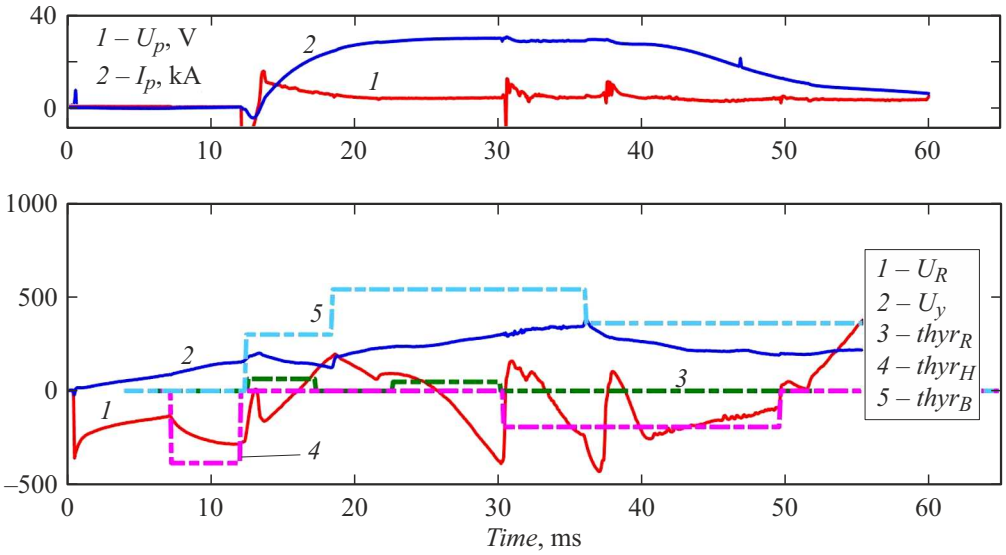

Рис. 4. Пример предпрограммного управления плазменным разрядом ФТ-2.

апреле 2025 г. испытания с новой системой управления плазмой показали ее работоспособность и удобство эксплуатации. На данный момент описанная система уже используется на токамаке ФТ-2 в режиме предпрограммного управления положением плазменного шнура. Дальнейшее развитие установки предполагает реализацию режима автоматического поддержания положения плазмы за счет обратных связей.

Финансирование работы

Разработка системы управления поддержана Физико-техническим институтом им. А.Ф. Иоффе в рамках государственного контракта FFUG-2021-0001. Тестирование системы и анализ данных поддерживались Физико-техническим институтом им. А.Ф. Иоффе в рамках государственного контракта FFUG-2024-0028.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

[1] J. Wesson, *Tokamak*, 3rd ed. (Clarendon Press, Oxford–N.Y., 2004).
[2] Ю.В. Митришкин, Н.М. Карцев, Е.А. Кузнецов, А.Я. Коростелев, *Методы и системы магнитного управления плазмой в токамаках* (КРАСАНД, М., 2020).
[3] S.I. Lashkul, V.N. Budnikov, E.O. Vekshina, V.V. D'yachenko, V.B. Ermolaev, L.A. Esipov, E.R. Its, M.Yu. Kantor, D.V. Kuprienko, A.Yu. Popov, S.V. Shatalin, Plasma Phys. Rep., **27** (12), 1001 (2001). DOI: 10.1134/1.1426133
[4] Л.А. Есипов, В.М. Завадский, С.В. Завадский, И.Е. Сахаров, С.В. Шаталин, в сб. *Тезисы докладов XXVI Звенигородской конференции по физике плазмы и управляемому термоядерному синтезу* (1999), с. 87.
[5] К.К. Васильев, *Теория автоматического управления (следящие системы)*, 2-е изд. (УлГТУ, Ульяновск, 2001).
[6] В.Э. Карпов, *ПИД-управление в нестрогом изложении* (М., 2012).