

ПРИМЕНЕНИЕ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ ТЕХНИКИ В ЭКСПЕРИМЕНТЕ

УДК 533.9.07

МОДЕРНИЗИРОВАННАЯ СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ КОМПЛЕКСОМ ИМПУЛЬСНЫХ МОДУЛЯТОРОВ “ВИКТОРИЯ”

© 2016 г. В. М. Павлов, К. И. Байструков, С. В. Меркулов, Ю. Н. Голобоков,
А. Н. Мальчуков, А. А. Мезенцев, Л. А. Лобес, А. М. Ли, С. А. Ильиных, М. М. Соколов*,
А. В. Николаев*, А. В. Овчинников**, А. Г. Качкин***

*Национальный исследовательский Томский политехнический университет
Россия, 634050, Томск, просп. Ленина, 30*

**Национальный исследовательский центр “Курчатовский институт”
Россия, 123182, Москва, пл. Академика Курчатова, 1*

***РФЯЦ–ВНИИ экспериментальной физики
Россия, 607188, Саров Нижегородской обл., просп. Мира, 37*

****Координационный центр “Управляемый термоядерный синтез – международные проекты”
Россия, 123182, Москва, пл. Академика Курчатова, 1*

E-mail: pavlov@tpu.ru

Поступила в редакцию 03.02.2015 г.

Рассматриваются результаты проектирования автоматизированной системы управления (а.с.у.) комплексом импульсных модуляторов “Виктория”, используемых для высоковольтного питания систем дополнительного нагрева плазмы на токамаках Т-10, Т-15, а также гиротронных стендов. А.с.у. построена на основе компонентов цифровой и микропроцессорной техники и обеспечивает управление силовой схемой высоковольтных модуляторов, контроль параметров нагрузки и противоаварийную защиту электротехнологического оборудования.

DOI: 10.7868/S0032816216010274

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Комплекс импульсных модуляторов (к.и.м.) “Виктория” состоит из 22 высоковольтных модуляторов (80 кВ, 3 МВт) и предназначен для высоковольтного питания устройств дополнительного нагрева плазмы установок Токамак Т-10 и Токамак Т-15, а также гиротронного стенда НИЦ “Курчатовский институт” (Москва). К.и.м. “Виктория” служит источником электропитания для систем дополнительного нагрева плазмы, к которым относятся ионно-циклотронный нагрев, нагрев сверхвысокой частотой, нагрев на основе нижнегибридного резонанса и система инжекционного нагрева.

Существующая система управления модуляторами создана в 1979 году и не соответствует требованиям проектируемой в настоящее время информационно-управляющей системы модернизируемой установки Т-15 в части надежности узлов и организации каналов информационного взаимодействия с автоматизированного рабочего места операторов и вышестоящими узлами а.с.у. систем дополнительного нагрева и общесистемной а.с.у. Проект технического перевооружения термоядерной установки Т-15 предусматривает

замену существующей системы управления к.и.м. “Виктория” при сохранении и максимальном использовании силовой части существующих модуляторов для электропитания оборудования систем дополнительного нагрева плазмы. Решение этой задачи рассмотрено в данной статье.

ОПИСАНИЕ АППАРАТУРНО-ТЕХНИЧЕСКОГО РЕШЕНИЯ

Принцип работы модуляторов основан на накоплении энергии в индуктивном накопителе, преобразовании ее высокочастотным инвертором с последующей трансформацией и выпрямлением напряжения. На рис. 1 представлена упрощенная структурная схема модулятора.

Особенность работы к.и.м. заключается в необходимости формирования управляющих импульсов, длительность которых может изменяться в широком диапазоне времени от единиц миллисекунд до нескольких десятков секунд. Например, сигналы оперативного управления и защиты модулятора по длительности фронта составляют 1 мкс; время реакции на событие не более 10 мкс и ряд параметров (готовности, уставки и т.п.) по периоду контроля и точности отвечают

Входные и выходные дискретные сигналы, обрабатываемые МУМ

Наименование сигнала	Обозначение сигнала	Примечание
Входные сигналы		
Готовность/авария а.с.у. д.н.	AHSRDY	Высокий уровень — да, низкий — нет
Авария внешней системы	ESYSEMR	Высокий уровень — да, низкий — нет
Запуск/останов модулятора	START	Высокий уровень — пуск, низкий — стоп
Авария модулятора	MDEMR	Импульсный (длительность 10 мкс)
Выходные сигналы		
Готовность/авария модулятора	MDRDY	Высокий уровень — да, низкий — нет
Подтверждение	MDACK	Высокий уровень — да, низкий — нет
Начало зарядки индуктивного накопителя	CHARGE	Импульсный (фронт 1 мкс, длительность 1 мс)
Фронт рабочего импульса	RISEPULSE	Импульсный (фронт 1 мкс, длительность 1 мс)
Срез рабочего импульса	FALLPULSE	Импульсный (фронт 1 мкс, длительность 1 мс)
Конец рабочего импульса	DISCHARGE	Импульсный (фронт 1 мкс, длительность 1 мс)
Запуск АЦП	ADCSTART	Высокий уровень — пуск, низкий — останов

обычным технологическим требованиям. Учитывая также то, что электрические интерфейсы всех цепей контроля и управления не унифицированы, использование серийно выпускаемых устройств для автоматизации модулятора или невозможно, или требует применения дополнительных специально разработанных согласующих устройств, формирователей и логических схем, реализованных на аппаратном уровне.

Описываемое в работе аппаратно-техническое решение поставленной задачи основано на использовании в автоматизированной системе управления ряда микропроцессорных устройств для сопряжения с технологическим оборудованием. В дальнейшем изложении более подробно рассмотрим особенности реализации системы.

А.с.у. к.и.м. обеспечивает: передачу сигналов управления от а.с.у. дополнительного нагрева к высоковольтным модуляторам; цифровую настройку параметров и управление к.и.м. “Викто-

рия” с автоматизированного рабочего места (а.р.м.) комплекса и пультов управления систем дополнительного нагрева. А.с.у. к.и.м. выполнена в виде двухуровневой системы (см. рис. 2).

Первый уровень представлен устройствами управления модуляторами (у.у.м.), каждое из которых управляет отдельным высоковольтным преобразователем. На этом уровне происходит сбор и первичная обработка аналоговых и дискретных сигналов о состоянии оборудования модулятора, передача цифровых сигналов управления от а.с.у. дополнительного нагрева к модуляторам, а также передача данных по стандартным протоколам в пультовую к.и.м. “Виктория”, пультовые а.с.у. дополнительного нагрева и на вышестоящий уровень автоматизированной системы.

Второй уровень включает в свой состав стойку общего управления и централизованного мониторинга и а.р.м. оператора а.с.у. к.и.м. “Викто-

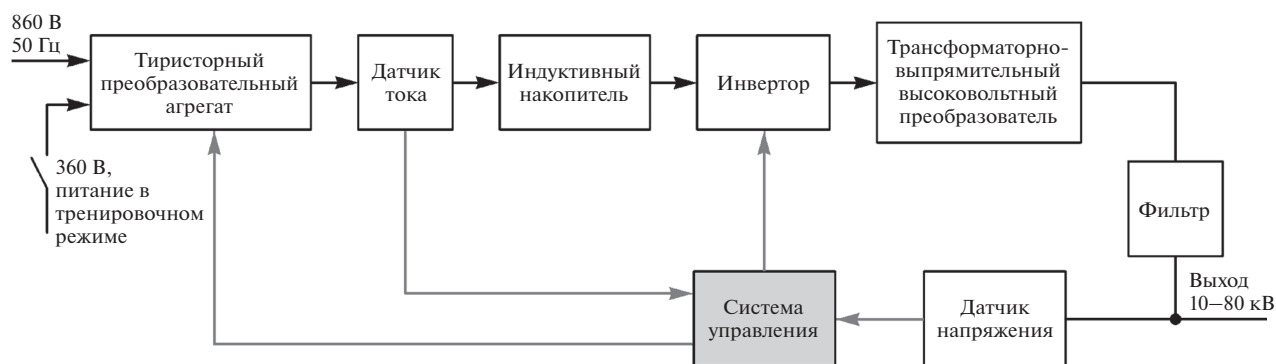


Рис. 1. Структурная схема высоковольтного модулятора.

рия”. Стойка предназначена для отслеживания состояния системы управления в целом, сбора, регистрации и первичной обработки данных с устройств управления модуляторами, а также для передачи данных по стандартным протоколам в центральную систему управления.

А.р.м. предоставляет оператору возможность контроля технологических процессов к.и.м., обеспечивающий сигнализацию об аварийных ситуациях и сбоях в работе, и позволяет формировать сигналы ручного дистанционного управления.

Устройство управления модулятором представляет собой э.в.м. в промышленном исполнении, оснащенную функциональными модулями ввода/вывода, и осуществляет:

- контроль параметров работы модулятора, отслеживание неисправностей и сбоев, в том числе срабатывание блокировок в случаях превышения уставок по току и напряжению нагрузки, ава-

рийное отключение (по внешнему сигналу от системы противоаварийной защиты);

- сбор, регистрацию и передачу на а.р.м. оператора информации по контролируемым и управляемым параметрам в процессе работы к.и.м.;

- прием команд управления от а.с.у. дополнительного нагрева, формирование и передачу сигналов на модулятор.

Базовым элементом у.у.м. является модуль управления модулятором (МУМ), предназначенный для ввода/вывода цифровых или дискретных сигналов по 32 проводным линиям с гибко конфигурируемой логикой обработки сигналов, основанной на применении программируемой логической интегральной схемы с FPGA-архитектурой (разработка ТомИУС-ПРОЕКТ, Томск).

В процессе функционирования МУМ осуществляет взаимодействие с а.с.у. дополнительного нагрева (д.н.), модулятором и другими устройствами, установленными в составе у.у.м.

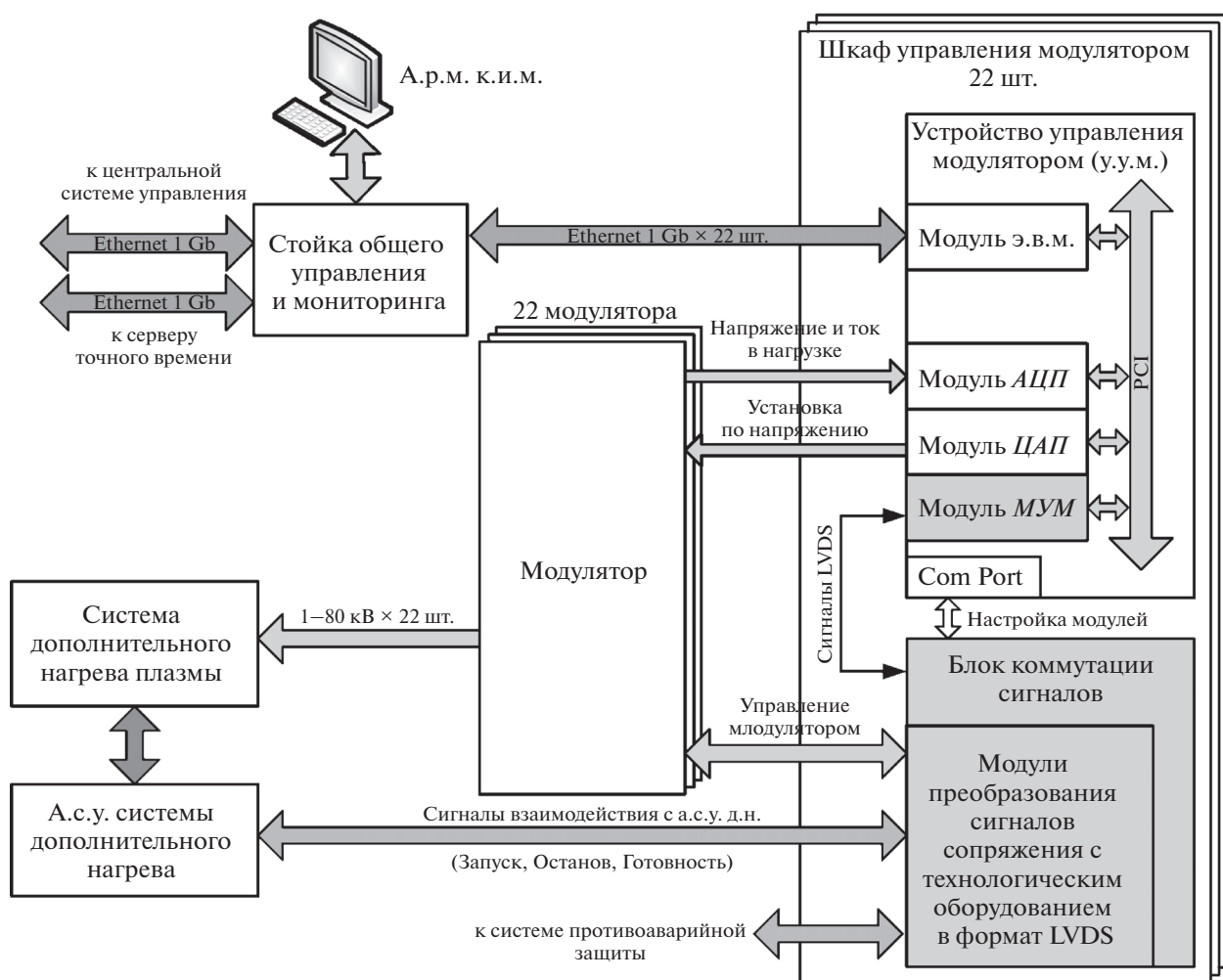


Рис. 2. Структурная схема а.с.у. к.и.м. “Виктория”. АЦП — аналого-цифровой преобразователь, ЦАП — цифроаналоговый преобразователь.

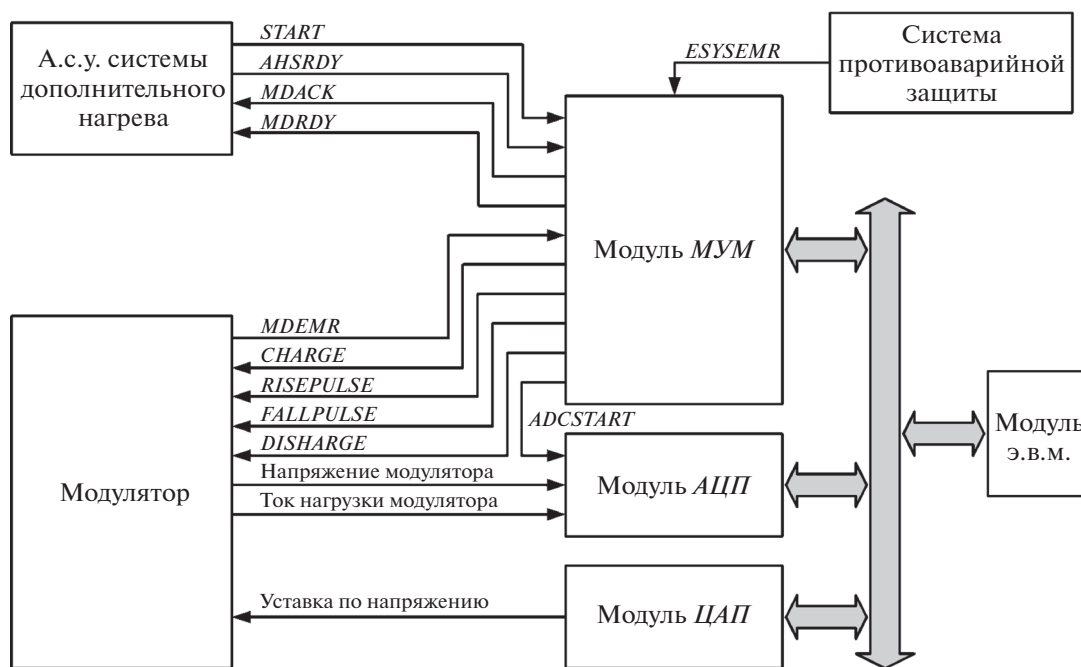


Рис. 3. Логическая схема взаимодействия МУМ с другими устройствами.

Логическая схема взаимодействия МУМ с другими устройствами во время работы системы представлена на рис. 3.

Состав, назначение и параметры основных дискретных сигналов, обрабатываемых и формируемых МУМ, приведены в таблице. Алгоритм функционирования модуля МУМ варьируется в зависимости от выбранного режима работы. Доступны следующие режимы: генерации одиночного импульса; внутриимпульсной модуляции; аварийного останова модулятора; защитного отключения модулятора по сигналу от АСУ ДН. Временная диаграмма работы МУМ в одном из режимов внутриимпульсной модуляции представлена на рис. 4.

При условии, что сигнал готовности а.с.у. д.н. *AHSRDY* имеет высокий логический уровень, на сигнал *MDRDY* на линии готовности модулятора устанавливается высокий логический уровень. При получении первого перехода в высокое логическое состояние сигнала на линии *START*, на линии *CHARGE* формируется управляющий импульс, а также выполняется запуск АЦП.

По истечении времени, необходимого для заряда индуктивного накопителя, формируется управляющий импульс на линии *RISEPULSE*. При переходе сигнала на линии *START* на низкий логический уровень генерируется импульс управления на линии *FALLPULSE*. При последующих переходах сигнала *START* с низкого логического уровня на высокий генерируется управляющий импульс на линии *RISEPULSE*.

Останов модулятора в режиме внутриимпульсной модуляции происходит при переходе сигнала на линии *AHSRDY* из высокого логического состояния в низкое. При этом генерируется управляющий импульс на линии *DISCHARGE* и снимается сигнал запуска АЦП (*ADCSTART*).

В случае аварии МУМ выполняет алгоритм защитного останова. При этом на линии *DISCHARGE* формируется импульс останова модулятора, на линии *MDACK* формируется высокий логический уровень, а на линиях *MDRDY* и *ADCSTART* — низкий.

Особенность технологического оборудования к.и.м. “Виктория” и систем дополнительного нагрева заключается в большом разнообразии дискретных сигналов контроля и управления (0–24 В; 0–100 В; TTL; оптический). Для преобразования различных видов и номиналов сигналов сопряжения с технологическим оборудованием в необходимый для МУМ формат электрических сигналов LVDS использованы модули блока коммутации сигналов разработки ТомИУС-ПРОЕКТ (рис. 2).

Все устройства управления модулятором отдельным кабелем соединяются непосредственно с коммутатором Ethernet, который входит в состав стойки общего управления. Физический канал передачи данных от у.у.м. в пультовую к.и.м. “Виктория” — оптический, интерфейс передачи данных — Ethernet, топология соединения — радиальная. Взаимодействие у.у.м. с верхним уровнем системы осуществляется в соответствии с протоколом ModbusTCP, который принят в каче-

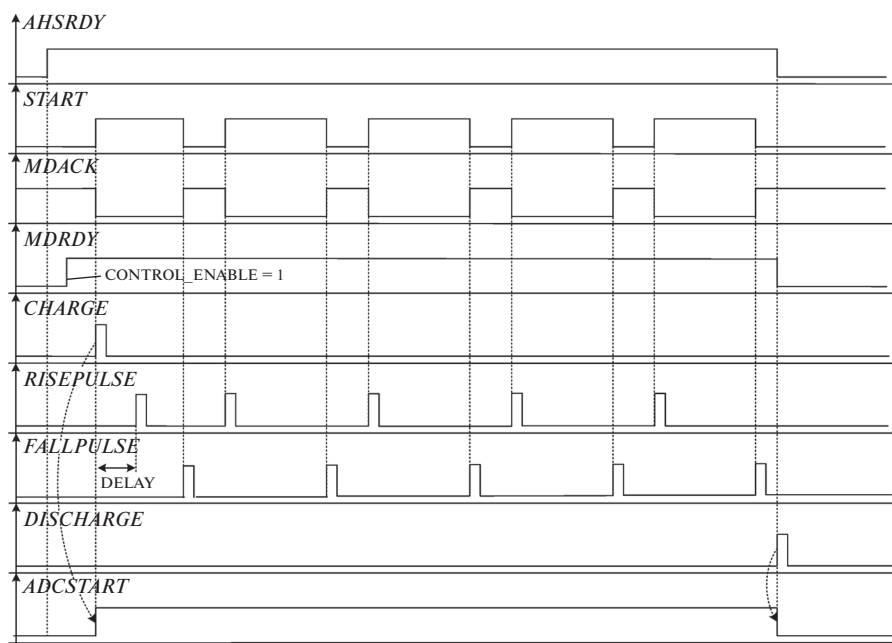


Рис. 4. Временная диаграмма работы МУМ в режиме внутриимпульсной модуляции.



Рис. 5. Вид графических форм: а — управление и контроль электропитания модуляторов; б — контроль и ввод параметров модулятора в у.у.м.; в — ввод команд управления у.у.м в соответствии с диаграммой состояний с учетом допустимых переходов. На панели системы дополнительного нагрева: ИЦР — ионно-циклотронного, НГР — на основе нижнегибридного резонанса, СВЧ — сверхвысокой частотой, СИН — инжекционного.

стве базового протокола для проектируемой в настоящее время информационно-управляющей системы токамака Т-15 (ИУС Т-15). Внешние взаимодействия у.у.м. выполняются путем использования унифицированного командного языка, предоставляющего средства для описания диаграммы состояний устройств в процессе подготовки к эксперименту и в его ходе [1].

Программное обеспечение стойки общего управления предназначено для контроля и хранения информации о состоянии а.с.у. и комплекса модуляторов в целом. Собранная информация хранится в базе данных и доступна по запросам вышестоящих узлов ИУС Т-15. В ходе подготовки эксперимента программное обеспечение стойки общего управления взаимодействует с центральной системой управления для приема данных планируемого сценария эксперимента и выполняет предпусковую автоматизированную настройку оборудования к.и.м. “Виктория”.

А.р.м. к.и.м. “Виктория” в процессе контроля и управления электропитанием систем дополнительного нагрева плазмы обеспечивает отображение оператору информации о состоянии модуляторов в а.с.у. д.н., формирование и выдачу сигналов управления к технологическому оборудованию к.и.м. “Виктория” (см. рис. 5). Прикладное программное обеспечение а.р.м. к.и.м. “Виктория” разработано в инструментальной среде Trace Mode 6.09 (AdAstra Research Group, Москва).

Программное обеспечение а.р.м. к.и.м. позволяет формировать команды управления оборудованием: включение и контроль состояния электропитания модуляторов, ввод значений параметров настройки для модулятора, контроль состояния технологического оборудования и хода выполнения команд оператора. Интерфейс пользователя построен в виде двух зон: технологические параметры (параметры эксперимента) и параметры а.с.у. Элементы интерфейса пользователя по этому признаку распределены по экранам

двух дисплеев. Переключение дополнительных кадров (кадров детализации) осуществляется в каждой зоне индивидуально.

С целью обеспечения безотказности в работе устройств управления модуляторами, программное обеспечение а.р.м. к.и.м. осуществляет расчет разрешенных состояний и контроль допустимых переходов у.у.м. в новое состояние. При возникновении ошибок в работе оборудования системы управления выполняется индикация факта ошибки и отображение ее кода. В режиме локального управления, когда модулятор отключен от а.р.м. к.и.м., команды оператора блокируются, осуществляется только контроль состояния оборудования.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Устройства разработанной а.с.у. к.и.м. позволили выполнить согласование модернизированной системы управления с электротехнологическим оборудованием высоковольтного модулятора на уровне сигналов контроля и управления. Внешние интерфейсы системы управления реализованы в соответствии с общесистемными требованиями на информационно управляющую систему термоядерной установки Т-15. В настоящее время система управления испытана в комплексе с оборудованием смежных систем автоматизации (а.с.у. системы дополнительного нагрева, центральной системы управления) и совместно с одним высоковольтным модулятором, нагруженным на гиротрон с.в.ч.-системы нагрева плазмы токамака Т-10 (НИЦ “Курчатовский институт”, Москва).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Мезенцев А.А., Павлов В.М., Голобоков Ю.Н., Евстифеев Д.А. // Известия Томского политехнического университета. 2013. Т. 323. № 5. С. 117.