

7) настройка регулятора мощности – автономная;

Рассмотренная в этой статье система автоматического регулирования мощности реактора ИГР является следующим шагом в развитии и совершенствовании технических средств реактора. Данная система существенным образом отличается от существующей, которая в настоящее время пока еще находится в эксплуатации. Основным преимуществом рассмотренной системы является улучшение функциональных характеристик и открытость структуры, обусловленная тем, что алгоритм регулирования и все логические и вспомогательные функции реализованы на программном уровне, что позволяет в дальнейшем проводить модернизацию и совершенствование алгоритмической части системы, не изменяя ее технического содержания, т.е. с минимальными затратами. Это очень важно, особенно для исследовательских стендов и установок, к которым и относится реактор ИГР.

Литература

1. Бать Г.А. и др. Исследовательские ядерные реакторы: Учебное пособие для вузов / Г.А. Бать, А.С. Коченов, Л.П. Кабанов. 2-е изд., пераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 1985. 280 с.
2. Хетрик Д. Динамика ядерных реакторов: Пер. с англ. – М.: Атомиздат, 1975. 400 с.
3. Rozon D. Nuclear Reactor Kinetics, Polytechnic International Press, 1998. 351 с.
4. LabView, User Manual, National Instruments, January 1998 Edition, Part Number 320999B-01
5. PCI/PXI-7030 and LabView RT User Manual, April 1999 Edition, Part Number 322154A-01

DESIGNING OF IGR REACTOR CONTROL SYSTEM FOR REALIZATION OF TEST DYNAMIC MODES

O.A.Gorbanenko, *Y.M.Kazmin, V.V.Dzalbo

National Nuclear Center of Republic of Kazakhstan (NNC RK)

**Institute of Atomic Energy NNC RK*

Purpose and the field of IGR reactor usage and the necessity of IGR reactor control system development are described in this article. The description of the structure of IGR reactor control system and its components and the operating algorithms are given. There are also results of the modeling tests and system characteristics.

УДК 537.5: 621.039.6

СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ПЛАЗМОЙ ТЕРМОЯДЕРНОЙ УСТАНОВКИ КТМ

**В.К. Ясельский, К.И. Байструков, В.М. Павлов, Л.Н. Тихомиров *,
И.Л. Тажибаева *, Е.И. Громаков, А.В. Шарнин, Е.А. Драпико**

Томский политехнический университет,

**Национальный ядерный центр Республики Казахстан*

Основным назначением термоядерной материаловедческой установки – токамака 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. Причем величина этих воздействий должна быть близка к ожидаемой в первом энергетическом реакторе ITER, чтобы можно было сделать вывод о применимости исследуемых материалов для изготовления

внутрикамерных элементов этого реактора. Наряду с этим основными задачами токамака КТМ являются исследования методов снижения тепловых нагрузок на диверторные пластины, достижение рабочих пределов по плотности электронов (n_e), бета-плазмы (β) и устойчивого разряда плазмы с большим уровнем тепловых и корпускулярных потоков на приемные устройства, исследование процессов формирования и устойчивого поддержания различных конфигураций плазмы и процессов и параметров плазмы в пристеночной и диверторной областях, а также широкий круг других материаловедческих и плазмофизических задач. Следовательно, достижение параметров плазмы требуемых значений, таких как, температура, интенсивность потоков частиц и тепловых потоков из плазмы, а также создание устойчивого разряда в течение достаточно длительного времени, порядка 5 секунд, является определяющим условием для проводимых на КТМ экспериментов. Решение данных задач невозможно осуществить без использования методов активного управления параметрами плазмы [1].

Следует отметить, что на многих действующих в настоящее время токамаках, таких, как DIII-D (США), Tore Supra (Франция), TCV (Нидерланды) и др., функции активного управления плазмой реализуются специальной системой, называемой системой управления плазмой, в дальнейшем СУП. Синтезу СУП для токамака КТМ на структурно-функциональном уровне и посвящена данная статья.

Сложность задачи разработки СУП определяется тем, что ее решение зависит от многих факторов, таких, как параметры электромагнитной системы токамака, его геометрия, состав и тип источников дополнительного нагрева плазмы, состав диагностического комплекса токамака и др. Анализ публикаций по системам управления плазмой действующих токамаков показывает, что общим подходом в этом вопросе является разработка СУП с позиции управления плазмой как многосвязным объектом [2,3]. При этом эффективность работы СУП зависит от того, насколько полно учтена взаимосвязь управляемых параметров в используемых в системе алгоритмах управления и моделях.

Проектируемая СУП должна обеспечить управление током плазмы, управление положением (равновесием) плазменного шнура по вертикали, управление формой плазмы, управление плотностью плазмы и вводом ВЧ-мощности в плазму. При этом в качестве основных управляемых параметров могут быть использованы следующие: общий ток плазмы I_p (МА), форма плазменного шнура $\Gamma(R,z)$, положение плазмы в объеме камеры по вертикали z (см), плотность плазмы n_e (частиц/м³), энергосодержание плазмы W_p (МДж/м³). Здесь R и z – принятое обозначение координат в плоскости поперечного сечения рабочей камеры. Рассмотрим подробнее задачи управления параметрами плазмы.

Плазменный разряд инициируется и затем поддерживается в течение разряда путём управляемого изменения тока I_{OH} в обмотке омического нагрева ОН или индукторе. Вид зависимости $I_{OH}(t)$, предварительно рассчитываемой и задаваемой в СУП перед очередным разрядом, показан на рис.1. Отработка этой зависимости в СУП приводит к пробоем рабочего газа в центре камеры КТМ, росту тока плазмы до заданного значения $I_p = 0,75$ МА и его поддержанию в течение 5 секунд на постоянном

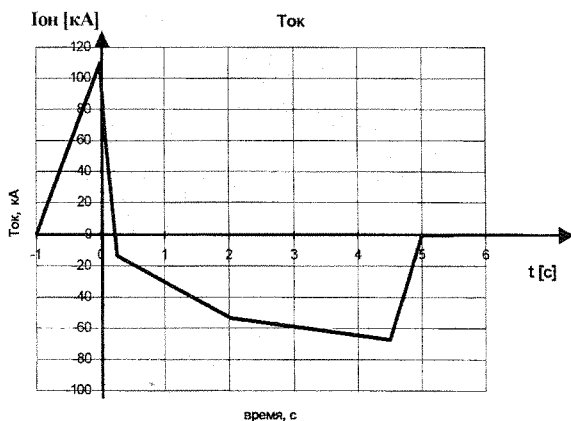


Рис. 1. Зависимость $I_{OH}(t)$

уровне. Важно отметить, что обработка зависимости $I_{OH}(t)$ в режиме логико-программного управления в данном случае неприемлема, поскольку параметры индуктивности L_i и проводимости σ_p плазмы, определяющие эффективность процесса трансформации энергии индуктора в плазму, в течение разряда постоянно изменяются. Поэтому СУП должна постоянно вести контроль величины I_{π} и корректировать зависимость $I_{OH}(t)$, чтобы поддерживать ток плазмы на заданном уровне. Величина I_{π} при этом измеряется с помощью поясов Роговского в шести точках по обходу тороидальной камеры КТМ.

С точки зрения управления равновесием плазмы стабилизация её положения по вертикали (z) в объёме камеры токамака является наиболее сложной задачей, особенно для установок с сильно вытянутой D – образной формой поперечного сечения плазмы, к которым относится и КТМ. В данном случае формируется плазма с вытянутостью $k_x \approx 1,6 \div 1,9$. Численное моделирование динамики перемещений плазменного шнура в рабочей камере КТМ по вертикали показывает, что инкремент неустойчивости вертикальных перемещений плазменного шнура составляет величину $\gamma \approx 300 \text{ с}^{-1}$ с учётом стабилизирующего влияния пассивных обмоток и оболочки рабочей камеры токамака [4]. Следовательно, для подавления вертикальной неустойчивости плазмы в КТМ СУП должна выполнять активную стабилизацию возмущений с циклом управления $\leq 0,3$ мс. Для формирования стабилизирующего воздействия на плазму в КТМ используются полоидальные обмотки HFC^+ и HFC^- , включенные последовательно в цепь питания быстродействующего управляемого инвертора тока, обеспечивающего требуемую динамику изменения тока I_{HFC} в этих обмотках. Контроль положения плазмы при этом осуществляется с помощью двухкомпонентных магнитных зондов, формирующих сигнал, пропорциональный величине перемещения плазмы по вертикали (координате z).

Задача управления формой плазмы $\Gamma(R, z)$ является особенно важной в КТМ, поскольку её решение направлено на создание специальных плазменных конфигураций: лимитерной, диверторной, с различными параметрами вытянутости (k_x) и треугольности (δ), обеспечивающих требуемые уровни воздействий на внутрикамерные элементы КТМ. Для решения данной задачи в электромагнитной системе КТМ имеется восемь обмоток полоидального поля PF1 \div PF8, токи в которых I_{PF} могут быть независимо изменены с помощью однополярных управляемых тиристорных выпрямителей. Зависимости $I_{\text{PF}_i}(t)$, аналогично зависимости $I_{OH}(t)$, рассчитываются до начала разряда, исходя из условий достижения требуемой плазменной конфигурации $\Gamma^*(R, z)$. Но в процессе плазменного разряда реальная форма плазмы отклоняется от требуемой за счёт естественных неустойчивостей, включая вертикальные перемещения плазмы, отмеченные выше. Поэтому СУП должна непрерывно отслеживать конфигурацию плазмы токамака на основе данных о текущем состоянии полоидального магнитного поля (потока $\Psi_p(R, z)$ и составляющих напряжённости магнитного поля B_{τ} и B_n) в 4 сечениях камеры КТМ и корректировать зависимости $I_{\text{PF}_1}(t) \div I_{\text{PF}_8}(t)$ таким образом, чтобы плазменная конфигурация соответствовала требуемой. Характеристики полоидального магнитного поля в каждый момент времени измеряются с помощью набора датчиков электромагнитной диагностики – 10 петель U_p , формирующих сигнал, пропорциональный производной потока Ψ_p , и 128 двухкомпонентных зондов, установленных в 4 сечениях тора по 32 шт. в каждом и формирующих величины тангенциальной (B_{τ}) и нормальной (B_n) составляющих полоидального магнитного поля. При этом для более точного определения положения плазмы в объёме камеры используется зондирование рабочего пространства с помощью радар-рефлектометра.

Рассмотрим далее реализацию контура управления плотностью плазмы. Плотность плазмы равна количеству электронов n_e и ионов n_i в единице объема и определяется балансом между скоростью поступления атомов рабочих газов (в данном случае, водорода и дейтерия) в плазму и временем жизни частиц τ . Если бы заранее были известны характеристики процессов поступления и ухода частиц из плазмы, то баланс можно было бы обеспечить простым алгоритмом логико-программного управления клапанами газонапуска по заранее заданным функциям $Q_H(t)$ и $Q_D(t)$. Но поскольку τ является случайной величиной и поступление газа в плазму – процесс также случайный за счет наличия газоотдачи со стенок камеры, поэтому в течение разряда должно выполняться измерение плотности плазмы с помощью специальной диагностики – одноканального интерферометра, чтобы уже по величине отклонения ΔQ_H и ΔQ_D формировать управляющие воздействия на регулируемые клапаны газонапуска.

Управление вводом ВЧ-мощности в плазму КТМ направлено на повышение энергосодержания плазмы W_n с целью увеличения её проводимости σ_p и, как следствие, увеличение длительности плазменного разряда за счёт снижения расхода энергии индуктора на поддержание требуемого тока плазмы. Критерием качества управления в данном случае является достижение максимального КПД установки ВЧ-нагрева. На начальном этапе ВЧ-нагрев плазмы в КТМ предполагается реализовать в режиме логико-программного управления, поскольку регулирование плазменной нагрузки является дополнительным возмущающим воздействием в контуре управления формой плазмы. Но и в случае логико-программного управления ВЧ-нагревом СУП должна решать (на основе данных о токе плазмы I_n , уровне ее плотности, положении границы плазмы Δ по отношению к ВЧ-антеннам) достаточно сложную задачу по оценке момента ввода ВЧ-мощности, амплитуды колебаний $U_{ИЦР}$, длительности ВЧ-импульса $t_{имп.}$ и длительности его фронта $t_{фр.}$

На основании рассмотренного можно сделать вывод о невозможности решения названных задач автоматизированного управления на основе автономных контуров регулирования. Контур управления в СУП должны работать взаимосвязанно как по электротехническим, так и по плазмофизическим параметрам токамака. При этом изменения токов $I_{OH}(t)$, I_{HFC} и $I_{RFi}(t)$ в соответствующих обмотках должны выполняться на основе математической модели токамака, описывающей взаимодействие токовых контуров обмоток ЭМС, рабочей камеры токамака и самой плазмы. А с учетом возмущений, которые, естественно, возникают в плазме в процессе ее эволюции за счет случайных изменений плотности n_e , изменений энергосодержания плазмы в момент ввода в нее ВЧ-энергии, наличия МГД-процессов, в СУП должны быть использованы модели, описывающие внутренние процессы в плазме, построенные на основе уравнений энергетического и материального балансов, а также уравнений магнитной гидродинамики [5].

Основываясь на анализе задач СУП, анализе проектных характеристик КТМ, его технологических систем, в частности электромагнитной системы, системы напуска рабочих газов, системы дополнительного нагрева плазмы на гармониках ИЦР, а также комплекса диагностических систем, была предложена структурно-функциональная схема СУП, приведенная на рис. 2.

ПЛАЗМА
(рабочая камера КТМ)

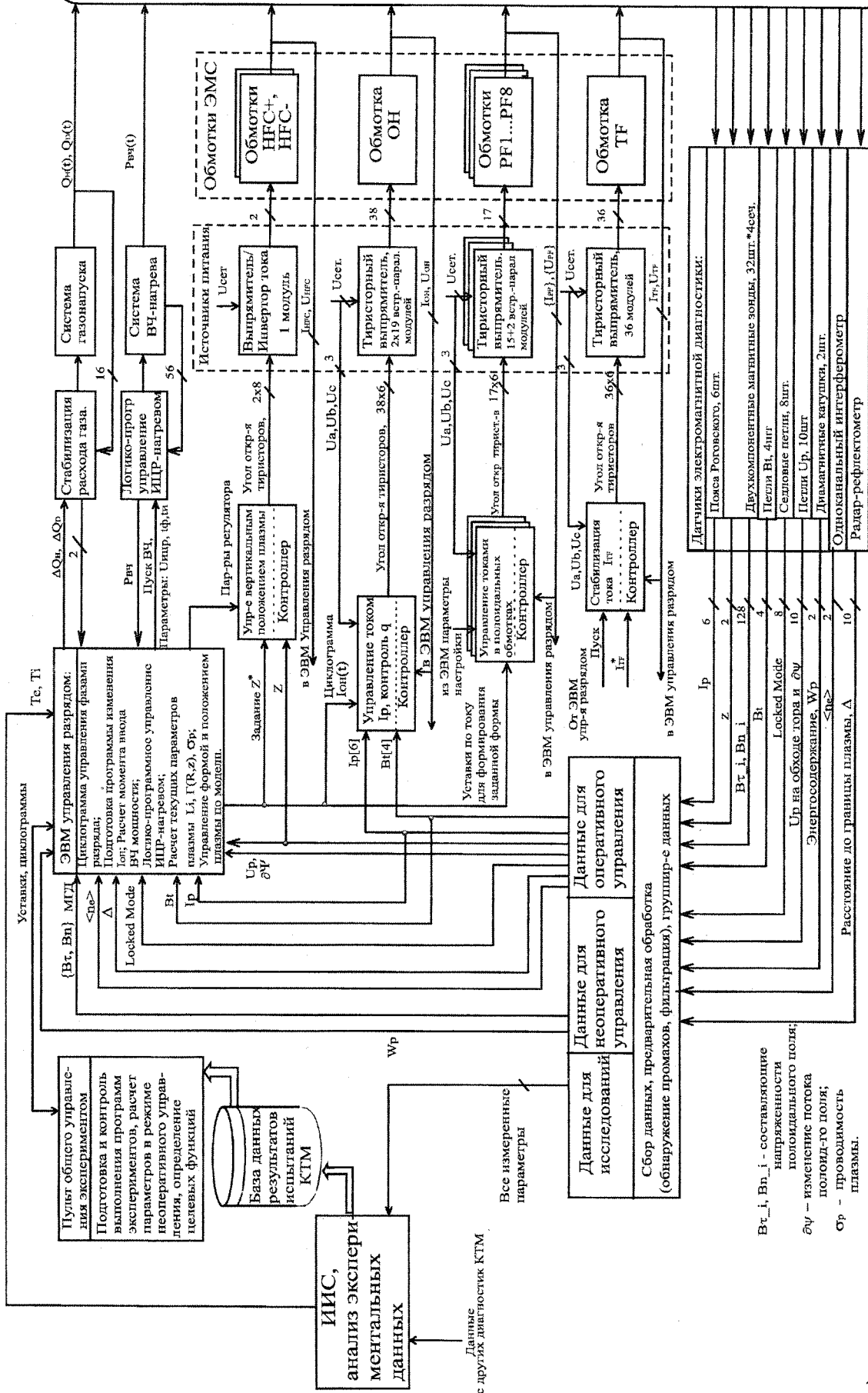


Рис.1 Структурно-функциональная схема системы управления плазмой токамака КТМ

Вч, i, Вч, i - составляющие напряженности поперечного поля;
 $\Delta\phi$ - изменение потока поперечного поля;
 Ор - проводимость плазмы.

Согласно данной схеме, первичная информация в СУП поступает с датчиков электромагнитной диагностики – поясов Роговского, двухкомпонентных магнитных зондов, измерительных петель, петель U_p и диамагнитных катушек, а также с одноканального интерферометра и радар-рефлектометра, предназначенных для измерения профиля электронной плотности и положения плазменного шнура в объеме рабочей камеры соответственно [6]. В общей структуре СУП функционально выделяются следующие контуры управления: током плазмы I_p , положением плазмы z , формой плазмы $\Gamma(R,z)$, стабилизацией тока I_{TF} в обмотке тороидального поля; логико-программного управления ИЦР-нагревом плазмы и плотностью плазмы n_e . Управляющие воздействия в первых четырех случаях формируются в микропроцессорных контроллерах и реализуются с помощью управляемых тиристорных источников питания и соответствующих обмоток ЭМС. Каждый из контроллеров использует для реализации алгоритма управления информацию, поступающую от диагностических систем, с датчиков токов и напряжений в обмотках ЭМС, и от ЭВМ управления разрядом, которая обеспечивает согласованное функционирование контуров управления и выполняет общее управление и координацию работы всех контуров СУП, участвующих в процессе создания плазмы и поддержания ее параметров. При этом выделяется четыре фазы: создание плазмы, путем быстрого переключения тока в обмотке ОН; омический разогрев плазмы; дополнительный разогрев; плавный вывод энергии из плазмы и прекращение разряда. Последняя фаза состоит из последовательности операций, инициируемых ЭВМ управления разрядом – отключения источников ВЧ-нагрева плазмы, снижения плотности плазмы, вывода токов из обмоток ЭМС.

Помимо управления фазами разряда, которое является главным образом логико-программным, ЭВМ управления разрядом выполняет расчет уставок для всех контуров управления на основе модели плазменного процесса токамака и их коррекцию в соответствии с текущими параметрами плазмы, информация о которых также поступает в нее от систем диагностики.

ЭВМ управления разрядом в процессе работы взаимодействует с пультом общего управления экспериментом, получая уставки и циклограммы прохождения разрядов, формируемые пультом на основе заданной оператором программы экспериментов.

СУП для уточнения моделей, используемых ею при управлении плазмой, необходима информация о результатах предыдущих разрядов. Поэтому в структурно-функциональной схеме СУП предусмотрена связь ЭВМ управления разрядом и пульта общего управления с базой данных результатов испытаний (БДРИ). В БДРИ сохраняется вся информация о процессе испытаний, собираемая информационно-измерительной системой (ИИС) с устройств диагностического комплекса КТМ. При этом данные с других более информативных диагностик, например с диагностики мягкого рентгеновского излучения, спектрометра излучения видимого диапазона, MSE- и CXRS- диагностик, могут быть использованы для оптимизации как алгоритма общего управления разрядом, так и алгоритмов управления отдельных контуров СУП.

Предлагаемая реализация системы управления плазмой на структурно-функциональном уровне интегрирует измеряемые параметры плазмы, управляющие воздействия и формирующие их элементы в единый взаимосвязанный комплекс, создавая основу для постановки качественных экспериментов и повышения эффективности проведения исследований на КТМ.

Литература

1. *Самойленко Ю.И. и др.* Управление быстропротекающими процессами в термоядерных установках. – Киев: Наукова думка, 1988. 379с.
2. *Ferron John* The DIII-D Plasma Control System. – General atomic. DIII-D news, April, 1996.
3. *Kimura T., Kurihara K.* JT-60U Plasma Control System // Fusion Technol. 1997. V.32. С. 404-414.
4. *Казахстанский* материаловедческий Токамак КТМ. Отчет о выполнении работ за период июль–декабрь 2000. – М.: ТРИНИТИ, 2001. 51с.
5. *Ясельский В.К., Байструков К.И., Павлов В.М. и др.* Техничко-экономическое обоснование реализации системы управления технологическими процессами (СУТП) термоядерной материаловедческой установки КТМ: Научно-технический отчет. Том I, № гос. рег. 01200010444, инв. № 02200005320. – Томск: ТПУ, 1999. 179с.
6. *Ясельский В.К., Байструков К.И., Павлов В.М. и др.* Техничко-экономическое обоснование реализации информационно-измерительной системы (ИИС) термоядерной материаловедческой установки КТМ: Научно-технический отчет. Том II, № гос. рег. 01200010444, инв. № 02200105291. – Томск: ТПУ, 2001. 203с.

УДК 621.039.62: 681.06

АДАПТАЦИЯ SCADA-СИСТЕМЫ В СТРУКТУРЕ ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЗАЦИИ ЭКСПЕРИМЕНТОВ НА ТЕРМОЯДЕРНОЙ УСТАНОВКЕ КТМ

**В.К. Ясельский, К.И. Байструков, В.М. Павлов, А.В. Шарнин,
Е.А. Драпико, А.Ю. Холоша, Е.И. Громаков, А.А. Стороженко,
Л.Н. Тихомиров*, И.Л. Тажибаева*, В.В. Дзалбо***

*Томский политехнический университет,
Национальный ядерный центр РК

Рассмотрены проблемы проектирования программного обеспечения системы автоматизации экспериментов (САЭ) термоядерной материаловедческой установки - токамака КТМ. Представлена структурная схема САЭ токамака КТМ. Проанализированы варианты адаптации SCADA-системы TRACE MODE (произв-во AdAstra Research Group, Ltd, Россия) в структуре ПО САЭ. Разработана и описана архитектура программного комплекса САЭ. Рассмотрены функционирование САЭ и информационные потоки в системе в режиме подготовки к экспериментам и в процессе проведения плазменных разрядов. Приведены формы отображения информации на пульте управления токамака КТМ. Предложены алгоритмы выполнения программ экспериментов в автоматическом режиме и под управлением оператора САЭ.

Токамак представляет собой сложную электрофизическую установку, надежное и эффективное функционирование которой может быть обеспечено только с помощью современной системы автоматизации экспериментов (САЭ), проводимых на ней в соответствии с программами исследований. В данной статье рассмотрены вопросы использования современных информационных технологий, реализуемых в SCADA-системе Трейс Моуд, при проектировании программного обеспечения (ПО) САЭ термоядерной материаловедческой установки – токамака КТМ, создаваемого в настоящее время Республикой Казахстан в содружестве с российскими научными организациями с целью исследования кандидатных материалов для первого термоядерного энергетического реактора ITER.

Следует особо отметить актуальность рассматриваемого вопроса для систем автоматизации такого типа, поскольку программное обеспечение, наряду со структурными и техническими решениями, в наибольшей мере определяет уровень информационной эффективности и высокие эксплуатационные характеристики САЭ.