

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ПО ОБРАЗОВАНИЮ
Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования
«ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

В.М. Павлов, А.В. Шарнин, Г.А. Майструк

ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ СИСТЕМА

*Рекомендовано в качестве учебного пособия
Редакционно-издательским советом
Томского политехнического университета*

Издательство
Томского политехнического университета
2008

УДК 681.518.3(075.8)

ББК 32.965я73

П12

Павлов В.М.

П12 Информационно-измерительная система: учебное пособие / В.М. Павлов, А.В. Шарнин, Г.А. Майструк. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2008. – 180 с.

ISBN 5-98298-322-5

Учебное пособие посвящено аспектам создания современных информационно-измерительных систем в области управляемого термоядерного синтеза. Особенностью информационно-измерительных систем данного класса является требование к предельно высокой скорости сбора больших объемов экспериментальных данных о быстропротекающих физических процессах и оперативное сохранение измерительной информации в специализированном хранилище данных.

Разработано в рамках реализации Инновационной образовательной программы ТПУ по направлению «Атомная энергетика, ядерный топливный цикл, безопасное обращение с радиоактивными отходами и отработанным ядерным топливом, обеспечение безопасности и противодействие терроризму» и предназначено для студентов, обучающихся по специальности 140306 «Электроника и автоматика физических установок» направления «Автоматизация научных исследований, испытаний и эксперимента».

УДК 681.518.3(075.8)

ББК 32.965я73

Рецензенты

Доктор технических наук, профессор,
заведующий кафедрой
информационно-измерительной техники ТУСУРа

А.А. Светлаков

Кандидат физико-математических наук, научный сотрудник
Института сильноточной электроники СО РАН

С.А. Попов

ISBN 5-98298-322-5 © Павлов В.М., Шарнин А.В., Майструк Г.А., 2008
© Томский политехнический университет, 2008
© Оформление. Издательство Томского
политехнического университета, 2008

ОГЛАВЛЕНИЕ

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ	6
ПРЕДИСЛОВИЕ.....	8
РАЗДЕЛ 1. ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ ДЛЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ИИС	9
1.1. Состав диагностического комплекса токамака КТМ	9
1.2. Измеряемые параметры. Метрологические характеристики измерительных каналов	12
1.3. Функции и режимы работы ИИС	13
РАЗДЕЛ 2. СТРУКТУРА ИИС	16
2.1. Общие требования к структуре ИИС	16
2.2. Структура подсистем сбора данных с датчиков диагностических систем	17
2.3. Архитектура системы сбора и послеэкспериментальной обработки информации токамака КТМ (третий и четвертый уровни ИИС)	18
РАЗДЕЛ 3. ИНФОРМАЦИОННОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ИИС	21
3.1. Структура информационных потоков ИИС КТМ	21
3.2. Структуры входных и выходных данных ИИС	28
3.2.1. Размещение данных в памяти вычислительных устройств	29
3.2.2. Структура областей разделяемой памяти ИИС.....	30
3.2.3. Структура конфигурационных данных ИИС. Содержание паспорта разряда	37
3.2.4. Перечень параметров, сохраняемых в базе данных результатов испытаний.....	39
3.2.5. Структура базы данных результатов испытаний.....	46
3.3. Пользовательский интерфейс представления данных ИИС	51
3.3.1. Перечень плазмо-физических параметров для представления оператору (ведущему физику) ИИС.....	51
3.3.2. Общие требования к представлению данных на пульте ИИС	52
3.3.3. Формы представления данных на пульте ведущего физика и панелях коллективного пользования.....	53
3.4. Интерфейсы и протоколы передачи данных ИИС	56
3.4.1. Интерфейсы для подключения блоков измерения, первичной обработки и регистрации к диагностическим системам	56
3.4.2. Интерфейсы и протоколы межуровневой передачи данных ИИС	58
3.4.3. Интерфейсы и протокол передачи данных из системы управления плазмой и системы противоаварийной защиты на третий уровень ИИС.....	61
РАЗДЕЛ 4. ЛОГИЧЕСКАЯ СТРУКТУРА БАЗЫ ДАННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ ИСПЫТАНИЙ ТОКАМАКА КТМ	63
4.1. Модель данных базы данных результатов испытаний	63
4.2. Типы полей данных базы данных результатов испытаний	67

РАЗДЕЛ 5. АЛГОРИТМЫ РАБОТЫ ИИС	70
5.1. Блок-схема работы ИИС в пусковом режиме и ее описание	70
5.2. Блок-схема алгоритма работы блока измерения, первичной обработки и регистрации.....	72
5.3. Блок-схема алгоритма сбора и регистрации диагностической и технологической информации в интервале между разрядами	73
5.4. Выбор алгоритмов сжатия данных в ИИС	76
5.4.1. Алгоритмы сжатия без потери информации	77
5.4.2. Алгоритмы сжатия с потерей информации	79
5.5. Функции и алгоритмы работы системы управления базой данных результатов испытаний.....	81
5.6. Алгоритмы оперативной и послеэкспериментальной обработки информации.....	83
5.6.1. Перечень вычисляемых параметров плазменного разряда	83
5.6.2. Состав и характеристики типовых алгоритмов обработки данных.....	84
5.6.3. Состав и характеристики специальных алгоритмов обработки.....	85
РАЗДЕЛ 6. ТЕХНИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ИИС ТОКАМАКА КТМ	88
6.1. Варианты технической реализации блоков измерения, первичной обработки и регистрации.....	88
6.2. Размещение оборудования ИИС	89
6.3. Структура комплекса технических средств третьего и четвертого уровней ИИС КТМ	91
РАЗДЕЛ 7. ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ИИС КТМ.....	93
7.1. Программное обеспечение второго уровня ИИС КТМ	93
7.2. Программное обеспечение третьего и четвертого уровней ИИС	96
7.3. Интерфейсы прикладного программирования для доступа к данным ИИС.....	99
7.4. Реализация доступа к базе данных результатов испытаний из системы MDSPplus	100
РАЗДЕЛ 8. ПОДСИСТЕМЫ СБОРА ДАННЫХ ИИС	104
8.1. Подсистемы сбора данных технологических диагностик	104
8.1.1. Подсистема сбора данных электромагнитной диагностики	105
8.1.2. Подсистема сбора данных с датчиков контактной тензометрии	106
8.1.3. Подсистема сбора данных с датчиков контактной термометрии.....	107
8.1.4. Подсистема сбора данных с анализатора остаточных газов.....	108
8.1.5. Подсистема сбора данных о параметрах высокочастотных генераторов	110
8.2. Подсистемы сбора данных физических диагностик.....	112
8.2.1. Подсистема сбора данных одноканального интерферометра- рефрактометра	112
8.2.2. Подсистема сбора данных многочастотного импульсного радар- рефлектометра	113
8.2.3. Подсистема сбора данных монитора Ha-Da излучения и обзорного спектрометра тормозного излучения видимого и ультрафиолетового диапазонов	115

8.2.4. Подсистема сбора данных диагностик «обзорный спектрометр ВУФ», «спектрометр высокого разрешения ВУФ»	117
8.2.5. Подсистема сбора данных с инфракрасных камер и видеокамер наблюдения критических зон токамака КТМ	119
8.2.5.1. Подсистема сбора данных с высокоскоростной инфракрасной камеры и видеокамеры наблюдения тепловых потоков на дивертор КТМ	119
8.2.5.2. Подсистема сбора данных дополнительных видеокамер наблюдения критических зон КТМ	120
8.2.6. Подсистема сбора данных магнитогидродинамической диагностики	120
8.2.7. Подсистема сбора данных диагностики жесткого рентгеновского излучения.....	122
8.2.8. Подсистема сбора данных рентгеновской томографической системы	123
8.2.9. Подсистема сбора данных диагностики «многоканальная болометрия»	123
8.2.10. Подсистема сбора данных корпускулярного анализатора	126
8.2.11. Подсистема сбора данных многоканального интерферометра	127
8.2.12. Подсистема сбора данных интерферометра X-точки	128
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	129
ПРИЛОЖЕНИЕ	133

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ

АСУ	– автоматизированная система управления;
АЦП	– аналогово-цифровой преобразователь;
БДРИ	– база данных результатов испытаний;
БИПР	– блок измерения, первичной обработки и регистрации;
ВАП	– время-амплитудный преобразователь;
ВОЛС	– волоконно-оптические линии связи;
ВССД	– встраиваемая система сбора данных;
ВУФ	– видимый и ультрафиолетовый (диапазон излучения);
ВЧ	– высокочастотное (излучение);
ДЖРИ	– диагностика жесткого рентгеновского излучения;
ДКТ	– диагностика контактной тензометрии;
ДТМ	– диагностика термометрии;
ИАП	– источник анодного питания;
ИИС	– информационно-измерительная система;
ИК	– инфракрасное (излучение);
ИП	– источник питания;
КТМ	– казахстанский токамак материаловедческий;
ЛМС	– локальный модуль синхронизации;
МГД	– магнитогидродинамический;
ММС	– магистрально-модульная система;
ОЗУ	– оперативно-запоминающее устройство;
ОИ	– одноканальный интерферометр;
ОС	– операционная система;
ПЗС	– прибор с зарядовой связью;
ПО	– программное обеспечение;
ПОУ	– пульт общего управления;
ПСД	– подсистема сбора данных;
РР	– радар-рефлектометр;
РТС	– рентгеновская томографическая система;
САЗ	– система аварийной защиты;
САЭ	– система автоматизации экспериментов;
СВЧ	– сверхвысокочастотное (излучение);
СПЗ	– система противоаварийной защиты;
СС	– система синхронизации;
СУП	– система управления плазмой;
СУТП	– система управления технологическими процессами;
ТЗ	– техническое задание;

- ТОКАМАК [ТОроидальная КАмера и МАгнитные Катушки] – тип то-
роидальных установок по созданию и магнитному удержи-
ванию высокотемпературной плазмы с целью проведения
реакций управляемого термоядерного синтеза;
- ТОУ – технологический объект управления;
- УСО – устройство связи с объектом;
- УТС – установки по управляемому термоядерному синтезу;
- ФСП – формирователь со следящим порогом;
- ФЭУ – фотоэлектронный умножитель;
- ЦБС – центральный блок синхронизации;
- ЭМД – электромагнитная диагностика;
- ЭМС – электромагнитная система.

ПРЕДИСЛОВИЕ

Основное назначение любой экспериментальной установки – получение информации об исследуемых процессах и явлениях. Для установок типа токамак ИИС – одна из самых важных частей, в которой получают и передаются интенсивные потоки измерительной информации, требующие оперативной обработки и сохранения для последующего использования. Необходимость сбора и обработки информации в больших объемах вызывает определенные требования к подсистеме, влияющие на ее практическую реализацию. Эти вопросы рассмотрены в данном учебном пособии.

Пособие состоит из восьми разделов.

В разделе 1 проводится анализ диагностического комплекса токамака, представлены перечень измеряемых параметров, функции и режимы работы ИИС.

В разделе 2 рассмотрены четырехуровневая структура ИИС токамака и протоколы межуровневой передачи информации.

В разделе 3 проведен анализ информационных потоков, структуры входных и выходных массивов данных и сообщений системы, рассмотрена структура базы данных результатов экспериментов, приведены исходные данные для проектирования пользовательского интерфейса, предложены формы представления данных ИИС.

В разделе 4 рассматривается логическая структура БДРИ, модель данных и типы полей.

В разделе 5 приведена информация об алгоритме работы ИИС в целом и отдельных диагностических подсистем, рассмотрены алгоритмы сжатия и передачи информационных массивов и алгоритмы послеэкспериментальной обработки.

Раздел 6 посвящен технической реализации ИИС, структуре и размещению оборудования диагностических подсистем.

В разделе 7 рассматриваются вопросы проектирования прикладного ПО для каждого иерархического уровня ИИС токамака.

В разделе 8 подробно рассматриваются особенности реализации каждой диагностической подсистемы токамака.

РАЗДЕЛ 1. ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ ДЛЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ИИС

Исходными данными для проектирования ИИС токамака КТМ являются материалы ТЗ на разработку технико-экономического обоснования установки КТМ, эскизный проект казахского материаловедческого токамака КТМ, информация о системах сбора данных современных зарубежных токамаков [17–19].

1.1. Состав диагностического комплекса токамака КТМ

ИИС предназначена для сбора, обработки, архивации и представления информации с диагностических систем токамака КТМ. Диагностические системы выполняют преобразование измеряемых параметров в электрические сигналы и подразделяются на технологические и физические диагностики.

При создании токамака КТМ устанавливается очередность внедрения диагностических систем. Диагностики первой очереди внедрения должны обеспечить проведение измерений, необходимых для выполнения физического пуска токамака КТМ. В их состав входят все технологические диагностики и физические диагностики первой очереди внедрения. Диагностики второй очереди внедрения предназначены для проведения экспериментальных исследований физики плазмы.

Полный перечень диагностик токамака КТМ приведен в табл. 1.1.1–1.1.3.

Таблица 1.1.1

Технологические диагностики

№	Название
1	ЭМД
2	Контактная тензометрия
3	Контактная термометрия
4	Анализаторы остаточного газа
5	Вакуумметры

Таблица 1.1.2

Диагностики первой очереди внедрения

№	Название
1	Интерферометрия X-точки
2	ОИ-рефрактометр
3	Многоканальный интерферометр (тангенциальный)
4	МГД-диагностика
5	Высокоскоростная камера для измерения потоков в диверторе
6	Спектроскопия ВУФ-диапазона
7	Монитор Na-Da
8	Обзорный болометр
9	Корпускулярный анализатор
10	Двухчастотный РР

Таблица 1.1.3

Диагностики второй очереди внедрения

№	Название
1	Рентгеновский монитор Те
2	Рентгеновская томография
3	Рентгеновский спектрометр
4	ДЖРИ
5	Сканирующий РР
6	Камеры видеонаблюдения критических зон
7	Многоканальная болометрия

Перечисленные диагностики имеют следующие технические характеристики.

- Технологические диагностики:
 - датчики ЭМД: 64 двухкомпонентных магнитных зонда по 32 шт. в двух сечениях;
 - датчики напряжения и тока в обмотках управления: 10 датчиков напряжения, 10 датчиков тока в катушках управления;
 - тензодатчики: 108 тензометрических розеток, 3 тензодатчика в розетке; размещение на вакуумной камере и элементах конструкции токамака КТМ;
 - вакуумметры, анализаторы остаточного газа и термопары включены в состав подсистем управления процессом вакуумно-технологической подготовки.

- Физические диагностики:
 - диагностика мягкого рентгеновского излучения: детекторы – четыре 32-элементные линейки pin или AXUV-диодов и предусилители; размещение в патрубках вакуумной камеры в одном сечении токамака; стойка с модулями усилителей в непосредственной близости от токамака;
 - ДЖРИ: 2 полупроводниковых детектора, размещение на трубке вакуумной камеры стойки с измерительной электроникой в непосредственной близости от токамака;
 - система измерения полной излучаемой мощности плазмы на основе болометров и пирозлектрических датчиков: детекторы – две 32-элементные линейки AXUV-диодов; предусилители; крепление к патрубкам вакуумной камеры в одном сечении токамака; стойка с усилителями и ИП в непосредственной близости от токамака;
 - обзорный спектрометр: оптическая подсистема – зеркала, дифракционные решетки, коллиматор; подсистема позиционирования; подсистема детектирования – усилитель яркости, микроканальная пластина, ПЗС-матрица; подключение к трубку вакуумной камеры, однохордовые измерения, спектральное разрешение 1024;
 - спектрометр высокого разрешения ВУФ-излучения; оптическая подсистема: зеркала, дифракционные решетки, коллиматоры; подсистема детектирования: усилитель яркости, микроканальная пластина, ПЗС-матрица; подключение к трубку вакуумной камеры (количество пространственных каналов 8, спектральное разрешение 512);
 - многоканальный интерферометр-поляриметр: СВЧ-подсистема в следующем составе – 2 СВЧ-генератора, СВЧ-волноводы, смесители, фазовращатели, блок мультиплексирования СВЧ-каналов, генераторы промежуточной частоты; аналоговая подсистема: усилители, фазовращатели, фазометры; 10 мультиплексируемых измерительных каналов; 2 аналоговых выхода для измерения значения на подключенном измерительном канале;
 - корпускулярный анализатор: вакуумный прибор в следующем составе – камера перезарядки, магнитный сепаратор, блок электрической сепарации, подсистема детектирования, подсистема формирования аналоговых сигналов (блоки предусилителей, дискриминаторов, формирователей).

Информация о размещении диагностического оборудования представлена в таблице размещения и характеристики диагностического оборудования (КТМ.03.001.001.ТП).

Большинство диагностик имеют компактный размер и размещаются на патрубках вакуумной камеры или занимают часть соответствующей стойки в экспериментальном зале. Две диагностики – обзорный и высокого напряжения спектрометры ВУФ-излучения – вынесены из экспериментального зала в прилегающее помещение. Схема размещения диагностического оборудования в экспериментальном зале показана на чертеже КТМ.03.001.002.ТП.

1.2. Измеряемые параметры. Метрологические характеристики измерительных каналов

Анализ исходных данных позволил систематизировать информацию о том, какие параметры плазмы могут быть определены перечисленными диагностиками по результатам прямых измерений. Результаты анализа представлены в табл. 1.2.1.

Таблица 1.2.1

Перечень определяемых ИИС КТМ параметров и метрологические характеристики измерительных каналов

№ п/п	Определяемый параметр	Диапазон измерения	Динамическая характеристика	Допускаемая погрешность измерительного канала, %	Допускаемая погрешность определения параметра (функции), %	Диагностика	Использование				Число измерительных каналов
							у*	ну*	о*	и*	
1	Ток плазмы I_p	0–1 А	1 кГц	< 1	< 2,5	ЭМД	√		√	√	6
2	Производная тока плазмы dI_p / dt	0–3 МА/с	10 кГц	< 0,5	< 0,5	ЭМД	√		√	√	6
3	Положение плазмы по вертикали	$\Delta Z_p =$ 0–20 см	100 кГц	< 1	< 1	ЭМД	√		√	√	2
4	Форма плазмы	$B_p =$ 0–0,45 Тл	100 кГц	< 0,5	< 5	ЭМД	√		√	√	64
			100 кГц	< 0,5	< 5	ЭМД			√	√	64
5	Энергосодержание плазмы, W	0–6 МВт	10 кГц	< 1	< 15	ЭМД		√	√	√	2
6	Напряжение на обходе, U_p	–200–30 В	100 кГц	< 1	< 1	ЭМД	√		√	√	20
7	Тороидальное поле, B_t	0–1 Тл	100 кГц	< 1	< 1	ЭМД	√		√	√	4
8	Среднее n_e вдоль хорды измерения	10^{18} – 10^{20} м ⁻³	100 кГц	< 0,5	< 0,5	ОИ	√		√	√	1

№ п/п	Определяемый параметр	Диапазон измерения	Динамическая характеристика	Допускаемая погрешность измерительного канала, %	Допускаемая погрешность определения параметра (функции), %	Диагностика	Использование				Число измерительных каналов
							У*	НУ*	О*	И*	
9	$n_e(r)$	$0,5 \cdot 10^{19} - 0,5 \cdot 10^{20} \text{ м}^{-3}$	10 кГц	< 0,5	< 5	РР	√		√	√	10
			10 кГц	< 1	< 10	многоканальный интерферометр		√		√	10
10	Убегающие электроны	0,1–10 МэВ	100 кГц	< 1	< 10	ДЖРИ		√	√	√	10
11	$T_e(r)$	1–20 кэВ	100 кГц	< 1	< 10	диагностика мягкого рентгеновского излучения		√		√	128
12	Профиль полной излучаемой мощности	1 эВ–5 кэВ (0,005–0,500 МВт м ⁻³)	10 кГц	< 1	< 10	ДПРД		√		√	64
13	$T_i(r)$	0,1–10 кэВ	1 кГц	< 1	< 10	обзорный спектрометр ВУФ				√	8
14	Поступление и баланс примесей	$10^9 - 10^{11} \text{ см}^{-3}$	1 кГц	< 1	< 10	спектрометр высокого разрешения ВУФ			√	√	8
15	Z_{eff}	1–5	10 мс	< 1	< 10	обзорный спектрометр ВУФ		√	√	√	8
16	МГД	0–0,2 В _p	10 МГц	< 0,5	< 10	МГД-диагностика				√	128
17	Профиль тока J, профиль q	(0,05–1,00) I _{max} , 1–6	10 кГц	< 1	< 10	многоканальный интерферометр		√		√	20
18	L-H переход	D _α излучение	1 кГц	< 1	< 10	Ha-Da			√	√	8

Примечание. * У – управление, НУ – неоперативное управление (межразрядная пауза), О – отображение, И – научные исследования.

1.3. Функции и режимы работы ИИС

Работа ИИС выполняется в соответствии с режимом работы стендового комплекса КТМ, для которого выделяются четыре режима работы.

1. **Режим текущей эксплуатации**, имеющий целью поддержание САЭ в исправном состоянии в то время, когда на КТМ не проходит экспериментальная кампания; выполнение профилактических работ и планово-предупредительных ремонтов; обучение персонала и т. п.

2. **Предпусковой режим**, имеющий целью проведение цикла подготовительных работ, предшествующих пуску, и состоящий из этапа непосредственной подготовки к проведению разряда (серии импульсов-разрядов) и этапа ожидания пуска (дежурного подрежима). В состав подготовительных операций входят не только стандартные регламентные работы, но и работы, связанные с реконфигурированием стендового комплекса и его составляющих.

3. **Пусковой режим**, имеющий целью осуществление собственно пуска, состоящего из серии импульсов-разрядов (подрежим разрядов) и пауз между ними (подрежим пауз между разрядами), необходимых для реализации эксперимента.

4. **Послепусковой режим**, имеющий целью выведение комплекса из пускового режима и обработку полученной в течение эксперимента информации.

Пусковой режим разделяется на подрежим разряда (5 с), в течение которого существует плазма, и подрежим межразрядной паузы (10 мин), в течение которой выполняется сбор, обработка и анализ результатов прошедшего разряда и задается сценарий следующего разряда.

Подрежим разряда

В подрежиме разряда ИИС КТМ выполняются функции сбора данных и буферизации измерительной информации на нижних уровнях ИИС, передачи информации в СУП и САЗ и представление наиболее важных результатов эксперимента в реальном времени протекания разряда.

Переход в подрежим разряда выполняется по событийному сигналу «Начало разряда», соответствующему времени t_0 и поступающему во все ПСД из СС токамака КТМ.

В момент времени t_0 выполняется первое измерение значений токов и напряжений в обмотках ЭМС. Величины механических напряжений (контактная тензометрия) и температуры в системе водяного охлаждения и элементов вакуумной камеры измеряются в течение всего пускового режима.

Для остальных диагностик проведение измерений становится возможным только спустя некоторое время после «начала разряда». Для этого значение измеряемого параметра должно превысить пороговую величину, соответствующую нижней границе его диапазона измерения (см. табл. 1.2.1). Начало проведения измерений для каждого параметра определяется независимо, но с точной привязкой к единому времени эксперимента. Проведение измерений начинается по сигналу «Сбор данных: Название параметра». В простейшем случае измерение всех параметров начинается одновременно при достижении током плазмы I_p порогового значения $I_p = 750$ кА.

При измерении каждого параметра частота дискретизации может изменяться в течение разряда для получения более детальной информации. Изменение частоты дискретизации происходит на определенных временных интервалах и/или при возникновении особых событий, например при срыве плазмы.

Вся измерительная информация буферизируется во время разряда в ПСД. Здесь также выполняется ее предварительная обработка с целью повышения достоверности результатов измерений.

Окончание измерений выполняется при получении сигнала «Конец разряда».

Параллельно с буферизацией во время разряда также выполняется формирование и передача соответствующей информации в СУП, САЗ и на верхний уровень ИИС в реальном масштабе времени. После завершения разряда и перехода в подрежим межразрядной паузы накопленная в ПСД информация передается на верхний уровень ИИС.

Подрежим межразрядной паузы

В подрежиме межразрядной паузы выполняются следующие функции ИИС КТМ: сохранение всей полученной в течение разряда измерительной информации в БДРИ; обработка и визуализация экспериментальной информации для выполнения анализа результатов разряда; корректировка сценария следующего разряда; подготовка к проведению следующего разряда.

РАЗДЕЛ 2. СТРУКТУРА ИИС

Токамак КТМ относится к классу сложных физических установок, поэтому при построении ИИС КТМ следует руководствоваться опытом создания систем сбора данных действующих токамаков – JT-60U, Asdex Upgrade, JET, NSTX.

2.1. Общие требования к структуре ИИС

Для перечисленных токамаков выделяются следующие основополагающие принципы построения систем сбора данных.

1. Диагностические системы должны быть полностью отделены от системы управления токамаком.

2. Каждая диагностическая система является независимой от других диагностических систем настолько, насколько это возможно.

3. Это утверждение распространяется как на аппаратные средства, так и на функции управления.

4. Архивация данных должна выполняться на верхнем уровне ИИС. При этом легко обеспечить многопользовательский доступ к данным, появляется возможность сравнивать данные, полученные в ходе одного/разных разрядов.

5. В интервале между двумя разрядами плазмы должен выполняться комплексный анализ экспериментальных данных. Для этого нужно иметь быстродействующую технику сбора данных, мощные высокопроизводительные компьютеры и быстродействующие системы передачи информации.

6. При построении компьютерных систем и выборе их компонентов во всех возможных случаях следует использовать открытые стандарты ММС. Выбор ММС с открытой архитектурой определяется тенденцией к замене и интеграции большого числа новых компонентов, интерфейсов и систем различных производителей в процессе будущей работы токамака.

7. Система сбора информации должна быть легко расширяема и поэтому должна иметь гибкую структуру.

С учетом имеющейся информации можно сформулировать принципы построения ИИС токамака КТМ.

Каждая диагностика должна быть независима от других диагностик как на аппаратном, так и на функциональном уровне. Для обеспечения аппаратной и функциональной независимости диагностик каждая диагностика должна иметь свою ПСД. ПСД должна обеспечивать управление диагностической подсистемой независимо от состояния вышестоящих уровней ИИС. Это обеспечит оперативность и независимость по-

лучения информации, предоставит функции тестирования и настройки диагностической системы специалистам в данной области диагностики, повысит гибкость ИИС, позволяя со временем легко заменять и добавлять новое, более совершенное диагностическое оборудование и ПСД, не изменяя общей структуры системы.

Технически ПСД предлагается реализовать на основе БИПР, размещаемого в непосредственной близости от соответствующей диагностической системы. Выбор типа и состава БИПР определяется параметрами диагностической системы, такими как количество точек измерения, скорость оцифровки информации, количество точек контроля, которые позволяют определить требуемую производительность БИПР, состав и характеристики модулей сбора и обработки информации (модули УСО). При выборе БИПР существенное внимание должно уделяться надежности его работы, что связано с большой важностью проведения эксперимента и работой БИПР в условиях воздействия сильных электромагнитных помех. Для всех БИПР должен быть предусмотрен стандартный способ подключения к верхнему уровню ИИС, СУП и СПЗ.

На верхнем уровне ИИС должен использоваться многомашинный вычислительный комплекс, обеспечивающий реализацию функций хранения, обработки, визуализации, анализа информации в соответствии с требованиями к режимам работы и функционированию ИИС.

С учетом перечисленных принципов построения в составе ИИС КТМ выделяется четыре иерархических уровня, представленных на чертеже КТМ.03.001.003.ТП.

Первый уровень ИИС включает аппаратные интерфейсы с диагностическим оборудованием, используемые для ввода измеряемых сигналов и, в некоторых случаях, для передачи сигналов синхронизации и управления к диагностической аппаратуре. В состав второго уровня ИИС входят ПСД, построенные на базе БИПР. Третий уровень ИИС выполняет функции обработки и хранения экспериментальных данных. На четвертом уровне осуществляется отображение информации на панелях коллективного пользования и пультах управления, а также формирование сценария разряда.

2.2. Структура подсистем сбора данных с датчиков диагностических систем

ПСД ИИС КТМ обеспечивают создание интерфейсов с диагностической аппаратурой, выполнение функций сбора, предварительной обработки и буферизации измерительной информации, а также передачу данных на третий уровень ИИС и в смежные системы – СУП, СС, СПЗ.

Основой ПСД ИИС КТМ являются БИПР. ПСД может быть полностью построена на базе одного БИПР. При большом количестве измери-

тельных каналов и в случае разнесения диагностического оборудования в пространстве экспериментального зала в составе ПСД может использоваться несколько БИПР. Для обеспечения единого интерфейса с третьим уровнем ИИС в составе ПСД помимо блоков БИПР также могут использоваться дополнительные интерфейсные модули, выполняющие связь с БИПР и последующее предоставление единого аппаратного интерфейса для связи с третьим уровнем ИИС. Для оптимизации технических решений и снижения затрат также предусмотрено объединение двух ПСД в одном БИПР в тех случаях, когда это не нарушает требуемого режима работы рассматриваемых ПСД и ИИС в целом.

Несмотря на большое число разнотипных диагностических систем токамака КТМ, можно выделить основные структурные элементы, которые присутствуют во всех БИПР. К ним относятся модули УСО, модули одноплатных ЭВМ, ЛМС, модули сетевого интерфейса. Состав модулей УСО определяется типом диагностической аппаратуры и включает модули ввода аналоговых сигналов с датчиков, модули цифровых интерфейсов сбора данных, модули аналогового и дискретного вывода, а также модули интерфейсов цифрового управления диагностической аппаратурой, в тех случаях, когда их использование определяется характеристиками диагностической аппаратуры.

2.3. Архитектура системы сбора и послеэкспериментальной обработки информации токамака КТМ (третий и четвертый уровни ИИС)

Архитектура третьего и четвертого уровней ИИС во многом определяется требованиями, предъявляемыми алгоритмами послеэкспериментальной обработки данных и предоставления информации потребителям. Для выполнения функций хранения, обработки и отображения информации в составе третьего и четвертого уровней ИИС должен использоваться высокопроизводительный многомашинный комплекс.

Структура системы сбора и послеэкспериментальной обработки информации токамака КТМ показана на структурной схеме КТМ.03.001.014.ТП.

На схеме выделены две группы источников информации – источники данных ИИС и источники данных СУТП. К источникам данных ИИС относятся ПСД с технологических и физических диагностик, выполняющие измерение и буферизацию экспериментальных данных в течение разряда и передающие информацию в БДРИ на интервале межразрядной паузы. Информационные потоки с ПСД технологических диагностик (F1) и ПСД физических диагностик (F2) на порядок превосходят информационные потоки, поступающие от источников данных

СУТП. К последним относятся информационный поток от системы управления (F3), информационный поток от СС (F4) и СПЗ (F5).

Перечисленные информационные потоки принимаются сервером сбора данных и архивирования результатов испытаний, где выполняется преобразование входных потоков данных, их сохранение в буферной памяти и занесение экспериментальных данных в БДРИ. Сохраненная в БДРИ информация предоставляется для послеэкспериментальной обработки и отображения. Для выполнения перечисленных функций предусмотрено использование отдельной ЭВМ – сервера сбора и архивирования данных. Это решение позволяет реализовать многопользовательский доступ к экспериментальным данным, обеспечивает высокую скорость обработки запросов, а также дает возможность выполнять передачу больших объемов информации для последующей обработки и отображения в течение подготовки к очередному разряду плазмы.

Во время проведения экспериментов наибольший приоритет по обслуживанию запросов к БДРИ КТМ имеют сервер обработки и визуализации, пульт ведущего физика и пульта операторов, а также рабочие станции САЭ КТМ. При этом выполнение доступа к БДРИ из внешних сетей не должно препятствовать решению указанных задач. Для выполнения задач обработки информации также предусмотрено использование отдельной ЭВМ. Необходимость этого определяется повышенными требованиями к вычислительным ресурсам для выполнения специализированных алгоритмов обработки. К ним относятся алгоритмы для решения задач моделирования и статистической обработки данных, алгоритмы расчета пространственно-временных распределений параметров плазмы, таких как форма граничной поверхности плазмы, распределение температуры и плотности электронов. Для послеэкспериментальной обработки и анализа данных в составе верхних уровней ИИС КТМ используются пакеты программ математической обработки (Excel, SAS, Matlab, Mathematica и др.), пакеты научных расчетов (EFIT, TRANSP, DINA), прикладные программы обработки данных на языках Fortran, Си, Pascal и др., а также программы визуализации данных и создания графических интерфейсов (Trace Mode, Labview и пр.).

При обработке данных и проведении научных исследований требуется иметь информацию о значении исследуемых параметров, полученную не только во время текущего разряда, но и во время других экспериментов. Для получения этой информации сервер БДРИ обращается к архиву экспериментальных данных. После извлечения и передачи данных из архива запрашиваемая информация некоторое время сохраняется в памяти сервера БДРИ для того, чтобы исключить повторные запросы и выборку данных из архива. Критерий актуальности данных, опреде-

ляющий необходимость их временного хранения, формируется на основе статистики обращений к информации в БДРИ КТМ. Чем чаще происходит обращение, тем выше критерий актуальности. Аналогично извлечению данных из архива при периодическом сохранении в архив накапливаемых в БДРИ результатов исследований учитывается критерий актуальности использования информации, и копии наиболее востребованных данных сохраняются в памяти БДРИ КТМ.

Запросы от WWW-сервера обслуживаются только в том случае, когда завершена обработка запросов с пульта ведущего физика и рабочих станций ИИС. WWW-сервер предусматривает два способа взаимодействия с БДРИ КТМ. В том случае, когда Web-клиенты предпочитают иметь гипертекстовое представление информации, на стороне WWW-сервера выполняется CGI-модуль доступа к БДРИ, транслирующий удаленные запросы к WWW-серверу в SQL-запросы к БДРИ и возвращающий результаты поиска. Для привилегированных пользователей помимо этого предоставляются программные интерфейсы удаленной работы, не использующие CGI-шлюз и работающие напрямую с сервером сбора и архивирования данных.

РАЗДЕЛ 3. ИНФОРМАЦИОННОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ИИС

3.1. Структура информационных потоков ИИС КТМ

Характеристики информационных потоков определяются составом измеряемых параметров (табл. 1.2.1) и режимами функционирования ИИС.

В подрежиме разряда пускового режима работы ИИС выделяются пять типов информационных потоков:

- 1) потоки от диагностической аппаратуры к БИПР ПСД;
- 2) потоки от БИПР в СУП;
- 3) потоки от БИПР в СПЗ;
- 4) потоки из систем управления на третий уровень ИИС к серверу сбора, регистрации и архивирования данных;
- 5) потоки от БИПР на третий уровень ИИС к серверу сбора, регистрации и архивирования данных.

Информация, передаваемая в потоках 1, 2 и 3, используется для выполнения алгоритмов управления и защиты установки в реальном масштабе времени разряда, и временные характеристики этих потоков должны строго обеспечиваться системой. Потоки 4 и 5 соответствуют послепусковому режиму работы САЭ, и, следовательно, требования к их временным характеристикам не являются жесткими.

В табл. 3.1.1 приведены характеристики информационных потоков, поступающих к БИПР в течение плазменного разряда.

Информационные потоки, приведенные в табл. 3.1.1, определены для каждого типа измерительных каналов ПСД. При этом выделяется два режима проведения измерений.

1. Выполнение измерений только в заданном временном окне и/или с изменяемой частотой дискретизации по времени. Каналы, для которых должен быть реализован такой режим измерения, в табл. 3.1.1 отмечены звездочкой. Количество информации, получаемой с диагностики в режиме окна за разряд, приведено в табл. 3.1.1 в качестве основной цифры, показанной без скобок.

2. Измерение в течение всего времени разряда с постоянной частотой дискретизации. В скобках в табл. 3.1.1 приведены значения объемов данных, собираемых за разряд, для этого режима измерений.

Таблица 3.1.1

*Состав измерительных каналов и характеристики
информационных потоков*

№ п/п	Подсистема / Измерительный канал	Кол-во каналов (шт.)	Кол-во регистрируе- мых измерений в секунду (слов/с)	Кол-во байт в слове (шт.)	Кол-во информации за разряд (Мб)	Общее кол-во инфор- мации за разряд (Мб)
ПСД с датчиков технологических диагностик						
	ПСД ЭМД:					130
1	· двухкомпонентные магнитные зонды	64	10^5	2	64	
	· петли U_p	4	10^5	2	12	
	· петли ψ_r	4	10^5	2	4	
	· петли ψ_v	32	10^5	2	4	
	· секторные петли	4	10^5	2	32	
	· пояса Роговского	4	10^5	2	0,4	
	· диамагнитные петли	8	10^5	2	0,4	
	· датчик градиента магнитного потока	22	10^5	2	8	
	· датчики токов и напряжений в обмотках ЭМС (пояса Роговского)	12	10^4	2	2,2	
2	ПСД с датчиков контактной термометрии:					
	· температура вакуумной камеры	160	10	2	0,016	
	· температура болтовых соединений обмоток	70	10	2	0,007	
3	ПСД с датчиков контактной тензометрии	108×3	10^3	2	3,24	
4	Подсистема анализа остаточных газов	5	10	2	0,0005	
БИПР физических диагностик						
1	ПСД ОИ	3	10^5	2	3	1900 [13650]
2	ПСД многочастотным импульсным РР	12	10^5	2	12	
3	ПСД монитора На-Да	9	10^6	2	10	
			10^6	2	9* [100]	
4	ПСД монитора рекомбинационной спектроскопии ВУФ-диапазона	10	10^6	2	10* [100]	

Окончание табл. 3.1.1

№ п/п	Подсистема / Измерительный канал	Кол-во каналов (шт.)	Кол-во регистрируемых измерений в секунду (слов/с)	Кол-во байт в слове (шт.)	Кол-во информации за разряд (Мб)	Общее кол-во информации за разряд (Мб)
5	ПСД ДЖРИ:					
	· интенсивность жесткого рентгеновского излучения	2	10 ⁵	2	2	
	· рентгеновский спектр	1	10 ⁵	2	1	
6	ПСД мягкого рентгеновского излучения:					
	· обзорный монитор Те	1	10 ⁵	2	1	
	· РТС	196	10 ⁵	2	196	
	· рентгеновский спектрометр	1	10 ⁵	2	1	
7	ПСД о полной излучаемой мощности плазмы:					
	· обзорный болометр	1	10 ⁵	2	1	
	· многоканальный болометр	64	10 ⁵	2	64	
8	ПСД о тепловых нагрузках на диверторные пластины:					
	· IR.cam	1	330 (512 × 512)	2	165* [825]	
	· V.cam.1	1	330 (512 × 512)	2	165* [825]	
9	ПСД с видеокamer наблюдения критических зон (V.cam.2 – V.cam.5)	1	10 ³ (512 × 512)	2	200* [2500]	
		3	10 ³ (512 × 512)	2	150* [750]	
10	ПСД МГД-диагностики	32	10 ⁷	2	200* [3200]	
11	ПСД обзорного спектрометра ВУФ	1	10 ³ (512 × 512)	2	200* [2500]	
12	ПСД спектрометра высокого разрешения ВУФ	1	10 ³ (512 × 512)	2	200* [2500]	
13	ПСД корпускулярного анализатора	28	10 ⁶	2	280	
14	ПСД многоканального интерферометра	8	10 ⁵	2	8	
15	ПСД многоканального интерферометра X-точки	32	10 ⁵	2	32	

Первый режим используется для снижения общей величины информационного потока. Второй режим позволяет иметь одинаковое временное разрешение на всем интервале разряда. В последнем столбце приведен объем информации, буферизируемой в ПСД в течение разряда.

В течение разряда параллельно с буферизацией информации в БИПР также выполняется передача в реальном масштабе времени части информации в СУП и СПЗ. Особенностью передачи информации для каждого из этих режимов работы является то, что информация передается в течение коротких, строго определенных интервалов времени. При этом важно определить длительность интервалов передачи, объем передаваемой информации и длительность циклов передачи для обеспечения требуемого режима функционирования перечисленных выше систем. В соответствии с этим представляет интерес оценка возможности обеспечения гарантированного времени передачи информации в течение заданных интервалов времени.

Информация, передаваемая от БИПР в СУП, используется в соответствующих контурах управления параметрами плазмы КТМ. При этом выделяются два цикла передачи: цикл передачи данных для контура управления положением плазмы, равный 100 мкс; цикл передачи данных для контуров управления формой, плотностью и энергосодержанием, равный 1 мс. В контур управления положением передаются вычисленное значение смещения плазмы Δz и значение тока плазмы I_p . В контур управления положением передаются значения с 32-компонентных зондов V_p , значения токов и напряжений в восьми обмотках ЭМС КТМ, значение тока плазмы I_p . В контур управления плотностью передаются значения средней плотности электронов $\langle n_e \rangle (t_i)$, значение мощности радиационных потерь $P_{\text{рад}}$, информация об амплитуде 2-й моды МГД-возмущений ($m = 2, n = 1$).

Важно отметить, что измерительная информация, поступающая в контур управления формой плазмы, обновляется с циклом 1 мс. Это позволяет учитывать более быстрые изменения формы плазмы и повышать устойчивость контура управления формой. Для остальных контуров управления передача информации также осуществляется в самом конце цикла обновления информации и на максимальной скорости передачи.

В СПЗ от БИПР передается следующая информация:

- величина скорости изменения интенсивности жесткого рентгеновского излучения;
- значение интенсивности жесткого рентгеновского излучения;
- величина напряжения на обходе;
- величина механических напряжений в элементах конструкции вакуумной камеры.

Каждой из перечисленных величин соответствует код длиной 2 байта, на основе которого формируется и передается по сети Ethernet информационное сообщение.

Сразу по завершении разряда на третий уровень ИИС передается для оперативного отображения на пульте ведущего физика информация о форме плазмы: зависимости $I_{TF}(t)$, $I_{CS}(t)$, $I_p(t)$, $P_{ICR}(t)$, $U_{PFij}(t)$, $U_p(t)$, график $Z_p(t)$, значение V_p , β_p и другие расчетные параметры.

По завершении разряда на третий уровень ИИС информация поступает от всех БИПР, включая блоки, подключенные к СУП и СПЗ. Кроме этого, на сервер сбора и регистрации данных от СУП будут передаваться вычисляемые в течение разряда данные, поскольку в СУП будет выполняться алгоритм реконструкции формы плазмы с циклом пересчета, равным 1 мс, и эти данные целесообразно затем использовать для визуализации и анализа в подрежиме межразрядной паузы.

Состав передаваемых параметров и характеристики информационных потоков ИИС КТМ в пусковом режиме представлены в табл. 3.1.2.

Таблица 3.1.2

Характеристики информационных потоков ИИС в пусковом режиме

№ п/п	Наименование потока	Объем данных, передаваемых в течение цикла	Длительность цикла передачи данных	Время передачи данных в течение цикла
1	БИПР → СУП: <u>в контур управления формой:</u> <i>от БИПР ЭМД:</i> пояса Роговского (I_p) – 1 шт.; ДМ зондов (V_p) – 32 × 2 шт.; измерительных петель (U_p , Ψ_{\perp}) – 10 шт.; диамагнитная петля ($\delta\Phi$) – 1 шт.; значений токов и напряжений в обмотках (I_{pf} , I_{hfs} , I_{OH}) – 8 шт.; <i>от БИПР ОИ:</i> < n_e > – 1 шт.; <i>от БИПР РР:</i> $n_e(R)$ – 1 шт.; $n_e(R_i)$ – 2 шт.	2 128 20 2 16	1000 мкс	100 мкс
	<u>В контур управления положением:</u> <i>от БИПР ЭМД:</i> пояса Роговского (I_p) – 1 шт.; зондов управления (Δz , ΔR) – 2 шт.; измерительных петель (Δz , ΔR) – 2 шт.; ДМ зондов (V_p) – 32 × 2 шт.; <i>от БИПР ОИ:</i> < n_e > – 1 шт.; <i>от БИПР РР:</i> $n_e(R)$ – 1 шт.	2 4 4 2 4 20	100 мкс	10 мкс

Окончание табл. 3.1.2

№ п/п	Наименование потока	Объем данных, передаваемых в течение цикла	Длительность цикла передачи данных	Время передачи данных в течение цикла
	<u>В контур управления током:</u> от БИПР ЭМД: пояса Роговского (I_p) – 1 шт.; измерительных петель (U_p) – 1 шт.; диамагнитных петель ($\delta\Phi$) – 1 шт.; от БИПР РР: $n_e(R)$ – 1 шт.; от БИПР диагностики МРИ: T_e – 10 шт.	2 2 2 20 20	1000 мкс	15 мкс
	<u>В контур управления плотностью:</u> от БИПР ЭМД: $U_{2\text{мгд}}$ – 1 шт.; от БИПР ОИ: $n_e(R)$ – 1 шт.	2 4	1000 мкс	5 мкс
	<u>В контур управления энергосодержанием:</u> от БИПР ЭМД: пояса Роговского (I_p) – 1 шт.; диамагнитных петель (β) – 1 шт.; от БИПР РР: $n_e(R)$ – 1 шт.; от БИПР ОИ: $\langle n_e \rangle$ – 2 шт.	2 2 20 4	1000 мкс	10 мкс
2	БИПР → СПЗ: от БИПР ЭМД: пояса Роговского (I_p) – 1 шт.; токов в обмотках (I_{pf} , I_{hf} , I_{cs}) – 10 шт.; седловых петель (Locked Mode) – 8 шт.; от БИПР ЖРИ: интенсивность ЖРИ – 1 шт.	2 20 16 2	1000 мкс	0.5 мкс
3	СУП → третий уровень ИИС I_p ; ΔZ ; ΔR ; $\Psi(R, Z)$; β ; $\langle n_e \rangle$; T_e .	2 2 2 50 2 2 2	1000 мкс	15 мкс

В подрежиме межразрядной паузы вся информация, накопленная в БИПР за время разряда, передается на верхний уровень ИИС для ее сохранения, обработки и визуализации.

Сразу после окончания разряда буферизируемая информация готова к передаче. С целью повышения скорости передачи информации от БИПР к серверу сбора и регистрации данных предлагается выполнять сжатие информации перед ее посылкой в сетевой канал. Выбор алгоритмов сжатия для использования в ИИС проведен в п. 5.4.

Время, затрачиваемое на передачу информации от БИПР на верхний уровень ИИС, можно оценить следующим образом. Время сбора данных сервером верхнего уровня при использовании сети Ethernet 100BaseFX и общем объеме зарегистрированных данных (см. табл. 3.1.1) будет составлять $\sim 2030 \text{ Мб} \times 0,5 / 6 \text{ Мб/с} = 169 \text{ с}$ без учета задержек, связанных с работой ПО. Значение 0,5 при расчете учитывает предполагаемый коэффициент сжатия данных. По предварительным оценкам, общие задержки, вызванные работой ПО, не должны превышать 100 с.

Таким образом, вся информация будет передаваться к серверу сбора, регистрации и архивирования данных за 270 с или 4,5 мин после окончания разряда. Полученное значение позволяет утверждать, что за отводимый 10-минутный интервал между разрядами ПСД будут подготовлены к началу следующего разряда. Перечисленные выше информационные потоки представлены на схеме информационных потоков ИИС КТМ (см. КТМ.03.001.006.ТП).

На схеме также показаны информационные потоки к пульту ведущего физика, ПОУ экспериментом, пульту оператора-технолога и к панелям коллективного пользования.

На функциональной диаграмме КТМ.03.001.005.ТП показан полный состав информационных потоков САЭ токамака КТМ, полученный с использованием CASE-технологии проектирования информационных систем IDEF-DESIGN.

Характеристики информационных потоков САЭ КТМ представлены в табл. 3.1.3.

Таблица 3.1.3

Величина информационных потоков САЭ КТМ

Наименование	Обозначение на функциональной диаграмме	Величина (Мб/сек)	Объем (Мб)
СУТП измерение	СУТП_изм	11,5	57,50
ИИС измерение	ИИС_изм	400 + (5560)	2000 + (16700)
СПЗ измерение	СПЗ_изм	0,1	0,50
Объем данных изм.		Всего:	2058 + (16700)
От СУТП на регистрацию ($K_{сж}$ 1:2)	СУТП_per	5,6	28,00

Окончание табл. 3.1.2

От ИИС на регистрацию (К _{сж} 1:2)	ИИС_рег	37,0	185,00
От СПЗ на регистрацию	СПЗ_рег	0,1	0,50
Объем регистрации данных (К_{сж} 1:2)		Всего:	213,50
От СУТП на представление	СУТП_пр	2,3	11,50
От ИИС на представление	ИИС_пр	6,4	32,00
От СПЗ на представление	СПЗ_пр	0,1	0,50
Объем данных представления		Всего:	44,00
СУТП (авария)	СУТП_авар	0,01	0,05
ИИС (авария)	ИИС_авар	0,02	0,10
КТМ (авария)	КТМ_авар	0,10	0,50
Объем аварийных данных		Всего:	0,65
СУТП документирование	СУТП_док	(10 стр/мин)	
ИИС документирование	ИИС_док	(20 стр/мин)	
СПЗ документирование	СПЗ_док	(2 стр/мин)	
Объем данных для документирования		Всего:	32 стр/мин
Из ИИС в СУТП для управления	ИИС_сутп	17,6	88,00
Из СУТП в ИИС для вычисления	СУТП_иис	0,3	1,50
Объем данных, пересылаемых между подсистемами		Всего:	89,50

На общей схеме информационных потоков САЭ токамака КТМ, представленной на рис. КТМ.03.001.005.ТП, показаны межуровневые и межсистемные связи и потоки данных, передаваемых в каждом случае.

3.2. Структуры входных и выходных данных ИИС

Входными данными для ИИС КТМ является информация, формируемая при измерении сигналов от технологических и физических диагностик, информация, поступающая от систем СУТП, СС, СПЗ, а также параметры настройки и команды конфигурирования, формируемые экспериментаторами в пультовой САЭ (верхний уровень ИИС).

При этом основными источниками информации для ИИС КТМ являются технологические и физические диагностики. Сохранение входных данных на нижнем уровне ИИС выполняется в буферной памяти БИПР в формате хранения, учитывающем особенности проведения измерений для каждой конкретной диагностики.

После завершения разряда данные переносятся из буферной памяти БИПР в разделяемую память сервера сбора и архивирования данных (третий уровень ИИС), где выполняется их преобразование в форматы хранения информации, используемые в базе экспериментальных данных, называемой в случае токамака КТМ БДРИ.

В настоящем пункте будут рассмотрены вопросы внутреннего представления данных в ИИС. К таким вопросам относятся следующие:

- способы размещения потоков данных в оперативной памяти БИПР;
- организация данных в оперативной памяти серверов ИИС: сервера сбора и регистрации данных и сервера обработки и представления данных;
- структуры и способы размещения данных на внешних носителях памяти ИИС.

3.2.1. Размещение данных в памяти вычислительных устройств

Для хранения входных, выходных, а также используемых только внутри ИИС данных предусмотрено формирование соответствующих структур хранения, размещаемых в памяти вычислительных устройств ИИС КТМ.

В соответствии со структурой информационных потоков ИИС КТМ, измерительная информация с диагностической аппаратуры измеряется и сохраняется в памяти ПСД в течение разряда. Для обеспечения высокой скорости передачи данных из памяти ПСД вся измерительная информация размещается в буферной оперативной памяти. Часть измерительной информации считывается для передачи в СУП и СПЗ в реальном времени протекания разряда. При этом вся без исключения измерительная информация сохраняется в буферной памяти ПСД до окончания разряда и после окончания разряда переносится в разделяемую память сервера сбора и архивирования данных третьего уровня ИИС.

Разделяемая память сервера сбора и архивирования данных размещается в оперативной и внешней памяти (в связи с большим объемом измеряемой за разряд информации). Указанная разделяемая память используется как буфер при занесении информации в БДРИ. БДРИ также размещается на сервере сбора данных и архивирования и работает под управлением СУБД. При этом данные БДРИ не только хранятся в оперативной памяти и на жестком диске сервера, но со временем перемещаются в архив экспериментальных данных, размещаемый в RAID-массиве.

Сразу после сохранения измерительной информации в БДРИ она становится доступной для передачи в сервер обработки и визуализации данных и в ЭВМ пульта ведущего физика. В процессе выполнения их работы экспериментальные данные размещаются в оперативной памяти и на внешних магнитных носителях. Во время межразрядной паузы там же размещаются полученные результаты обработки и значения новых конфигурационных параметров. К моменту окончания межразрядной паузы и начала следующего разряда все результаты обработки, справочная информация и конфигурационные параметры должны быть сохранены в БДРИ. Это позволит исключить дублирование информации из БДРИ на ЭВМ пульта ведущего физика и в сервере обработки и визуализации данных, а также будет гарантировать использование информации во всех последних изменениях.

WWW-сервер является отдельной ЭВМ, не входящей в состав ИИС КТМ и размещающей полученную из БДРИ информацию в собственных структурах хранения во внутренней и внешней памяти.

3.2.2. Структура областей разделяемой памяти ИИС

Имеющаяся в ИИС КТМ информация очень часто используется одновременно несколькими ЭВМ, входящими как в состав самой ИИС, так и в состав СУП, СС, СПЗ. Помимо этого, к результатам исследований предоставляется удаленный доступ через WWW-сервер.

При решении перечисленных задач в составе ИИС КТМ предусмотрено использование разделяемых областей памяти.

Необходимость использования разделяемой памяти на втором уровне ИИС определяется требованиями к одновременному выполнению регистрации измерительной информации в буферной памяти БИПР и передаче отдельных измеренных значений в СУП и СПЗ в реальном масштабе времени. Рассматриваемые области разделяемой памяти полностью размещаются в оперативной памяти БИПР и должны иметь относительно простую структуру для обеспечения высокой скорости выборки.

Для хранения экспериментальных данных и служебной информации в БИПР используются следующие информационные структуры:

- буфер экспериментальных данных;
- таблицы информационных параметров;
- таблица калибровки измерительных каналов.

Большинство ПСД токамака КТМ являются многоканальными. В многоканальной системе сбора данных требуется сохранять информацию об измеренном значении и номере соответствующего ему измерительного канала, времени измерения, а также дополнительную информацию, такую как значения калибровочных коэффициентов усиления

для каждого канала, коэффициенты пересчета абсолютных измеренных значений в физические параметры и пр. В простейшем случае в буфере экспериментальных данных требуется сохранять только измеренные значения. Остальная информация должна сохраняться в соответствующих информационных структурах и использоваться при выполнении предварительной обработки и формировании данных для передачи на третий уровень ИИС и второй уровень СУП.

Такой подход предполагает наличие двух этапов обработки. На первом этапе все экспериментальные данные сохраняются в буфере экспериментальных данных. Затем выполняется предварительная обработка и формирование данных для передачи в соответствующие системы. Недостатком рассматриваемого подхода является необходимость перемещения экспериментальных данных из оперативной памяти во вторичную память или использование дополнительной оперативной памяти для хранения промежуточных результатов обработки и формируемых массивов данных. Большой объем экспериментальных данных токамака КТМ не позволяет выделить дополнительную оперативную память для выполнения обработки, а использование накопителей на магнитных дисках не предусмотрено в проектных решениях. Поэтому экспериментальные данные сразу должны сохраняться в более сложных структурах данных. В этом случае появляются следующие преимущества: можно более эффективно выполнять поиск и обработку интересных измеренных значений; данные из буфера экспериментальных данных могут напрямую использоваться для формирования сетевых пакетов, передаваемых на третий уровень ИИС и второй уровень СУП.

Формат хранения данных в буфере экспериментальных данных может различаться для разных ПСД. Отличия определяются количеством и типом измерительных каналов, типом модулей УСО и требованиями к изменению временного разрешения в процессе разряда.

Среди ПСД следует отдельно выделить подсистемы, работающие с многоэлементными детекторами и опрашивающие за один временной срез очень большое число детектирующих элементов. К таким подсистемам относятся ПСД о тепловых нагрузках на диверторные пластины (одна ИК-камера и одна видеокамера); ПСД видеокамер наблюдения критических зон; ПСД обзорного спектрометра ВУФ; ПСД спектрометра высокого разрешения ВУФ. В перечисленных системах за один временной срез требуется измерить сигнал с каждой ячейки ПЗС-матрицы. При использовании матрицы размером 512×512 пикселей за один временной срез будет получено 250 К слов. Сохранение полученных данных в последовательный файл недопустимо, т. к. при этом обязательно

потребуется выполнять переформатирование даже на этапе передачи на третий уровень ИИС. Поэтому для каждого временного среза нужно использовать дополнительные структуры хранения. Это важно еще и потому, что рассматриваемые структуры имеют ясный физический смысл. Для спектрометров они содержат информацию о спектре излучения, а для ИК-камер и видеокамер – изображение интересующей области.

В соответствии с рассматриваемым подходом формат хранения данных в буфере экспериментальных данных ПСД о тепловых нагрузках на диверторные пластины будет иметь вид, показанный на рис. 3.2.2.1. За один временной срез в буфере экспериментальных данных ПСД о тепловых нагрузках на диверторные пластины будет заполнено два поля, содержащих по массиву данных из 250 К слов. В каждом поле будет храниться соответствующий цифровой снимок. Перечисленные поля будут последовательно записываться в буфер экспериментальных данных для следующих временных срезов. Буфер экспериментальных данных ПСД с видеокамер наблюдения критических зон будет иметь аналогичную структуру.

Поле 1: IR.cam (t = t1)	
1 пиксел	2 пиксел
3 пиксел	4 пиксел
.....	
249999 пиксел	250000 пиксел
Поле 2: V.cam (t = t1)	
1 пиксел	2 пиксел
3 пиксел	4 пиксел
.....	
249999 пиксел	250000 пиксел
.....	

Рис. 3.2.2.1. Формат хранения цифровых изображений в буфере экспериментальных данных

Формат хранения данных в буфере экспериментальных данных ПСД обзорного спектрометра ВУФ-и ПСД спектрометра высокого разрешения ВУФ представлен на рис. 3.2.2.2. В каждом поле буфера сохраняется информация о спектре излучения вдоль одной из хорд наблюдения. В зависимости от режима опроса ПЗС-матрицы в этом поле может храниться либо одномерный массив (512 элементов), либо двумерный массив (512 × N), требующий дополнительной обработки для приведения к виду одномерного массива.

Поле 1: спец.obz (t = t1)			
Спектр 1	1 пиксел	2 пиксел	
		
	511 пиксел	512 пиксел	
.....			
Спектр 10	1 пиксел	2 пиксел	
		
	511 пиксел	512 пиксел	
Поле 2: спец.high (t = t1)			
Спектр 1	1 пиксел	2 пиксел	
		
	511 пиксел	512 пиксел	
.....			
Спектр 10	1 пиксел	2 пиксел	
		
	511 пиксел	512 пиксел	
.....			

Рис. 3.2.2.2. Формат хранения спектрометрических измерений в буфере экспериментальных данных

Помимо рассмотренных выше ПСД с многоэлементных детекторов, остальные ПСД ИИС КТМ имеют сравнительно небольшое количество измерительных каналов. В соответствии с данными о составе измерительных каналов, максимальное количество точек измерения среди технологических диагностик имеет ДКТ – 108×3 каналов, и среди физических диагностик РТС – 196 каналов. Для перечисленных ПСД измерения для одного временного среза значения будут последовательно записываться в буфер экспериментальных данных. При этом следует принимать во внимание, что ПСД контактной тензометрии будет размещена на три крейта, и в ней будут использоваться три буфера экспериментальных данных. Каждое измеренное значение будет записываться в виде двухбайтного слова.

Таким образом, можно обобщить информацию о форматах хранения данных в буферах экспериментальных данных. Для большинства ПСД формат хранения данных в буфере экспериментальных данных будет иметь вид, показанный на рис. 3.2.2.3. Он представляет собой файл с последовательной организацией полей. Каждое поле содержит двухбайтное измеренное значение с соответствующего измерительного канала. Порядок опроса измерительных каналов определен в дополнительной информационной структуре. Для ПСД с многоэлементных де-

текторов типа ПЗС-матриц формат хранения данных в буфере экспериментальных данных показан на рис. 3.2.2.1, 3.2.2.2.

t = t1	Поле 1 (2 байт)
	Поле 2 (2 байт)

	Поле N (2 байт)
t = t2	Поле 1 (2 байт)
	Поле 2 (2 байт)

	Поле N (2 байт)
.....	

Рис. 3.2.2.3. Формат хранения данных для ПСД с количеством точек опроса $N \leq 196$ за один временной срез

Рассмотренные форматы хранения данных в буферах экспериментальных данных не всегда могут быть использованы при изменении частоты опроса измерительных каналов во время разряда. При изменении частоты оцифровки в заданных временных окнах потребуется вводить дополнительные информационные структуры или изменять рассматриваемый формат хранения данных.

На токамаке КТМ интервалы с постоянной частотой оцифровки задаются двумя способами: определяются до проведения эксперимента и/или формируются по событийным сигналам синхронизации во время разряда. Рассмотренные выше структуры могут использоваться при сохранении результатов измерений для двух перечисленных режимов, но обладают многими недостатками. Во-первых, они могут быть использованы только в том случае, если результаты измерения не потребуется передавать в другие системы во время разряда. Также они плохо приспособлены для поиска во всем массиве и выборки отдельных измеренных значений, которые потребуется формировать для передачи в систему управления и отображать в реальном масштабе времени на третьем уровне ИИС. Для организации процесса выборки данных в реальном масштабе времени необходимо использовать дополнительную служебную информацию для поиска интересующих значений. При этом возможно использование трех подходов.

Рассмотрим основные требования к формату хранения данных при проведении измерений в режиме временных окон (с изменением частоты оцифровки в каждом окне), с возможностью выборки данных для передачи в СУП и СПЗ во время эксперимента. При этом информация о частоте оцифровки должна сохраняться для каждого временного среза (фрейма).

Одним из путей решения этой задачи является сохранение меток времени для каждого временного окна вместе с экспериментальными данными. Это приведет к формированию для каждого окна дополнительного двухбайтного слова «Метка времени». При этом объем буфера экспериментальных данных возрастет на величину «Количество фреймов \times 2 байт» и при временном разрешении 100 кГц на интервале 5 с потребует использования дополнительной памяти объемом 1 Мб.

Для уменьшения объема служебной информации в буфере экспериментальных данных можно использовать второй подход. Принцип данного подхода состоит в фиксации моментов начала и конца временного интервала с неизменной частотой оцифровки. Значение частоты оцифровки для каждого интервала можно получить из специальной информационной структуры, которая хранится в отдельной области памяти. Тогда смену частоты оцифровки можно задать, используя только один бит для каждого фрейма. При этом увеличивается время поиска интересующего значения в буфере ПСД, что может быть критичным при передаче в СПЗ или отображении на третьем уровне ИИС в реальном масштабе времени.

Третий подход основан на использовании индекса временных меток и внешней информационной структуры для поиска измеренных значений (рис. 3.2.2.4). Этот формат занимает промежуточное положение между рассмотренными выше первым и вторым форматами. Основными его достоинствами являются возможность прямой выборки интересующего значения и достаточно высокая компактность. Ограничение на количество временных окон (16 шт.) можно преодолеть, усложняя внешнюю информационную структуру поиска.

Индекс временных меток, 4 бит (код метки)				Измеренное значение, 12 бит
1	0	0	1	#
0	1	0	1	#
0	0	1	1	#
0	1	1	0	#
1	1	0	0	#

Рис. 3.2.2.4. Структура идентификатора фрейма

В связи с тем, что в большинстве случаев длина слова полезных данных не превышает 12-ти бит, индекс временных меток может быть записан в свободные 4 старших бита первого слова во фрейме. Таким образом, в соответствии с третьим подходом, формат хранения данных, измеренных в заданном временном окне, представлен на рис. 3.2.2.5.

Примечания	Биты данных 16–0		
Номер буфера	Биты 15–14	Резерв	
Заголовок фрейма № 1	Биты 15–0		
Слово данных № 1	Слово данных № 1		
	Бит 15	Биты 12–14	Биты 0–12
		
Слово данных № К	Слово данных № К		
	Бит 15	Биты 12–14	Биты 0–12
		
Заголовок фрейма № 2	Биты 15–0		
		

Рис. 3.2.2.5. Формат хранения данных при проведении измерений во временном окне

Использование рассмотренных форматов данных позволяет упростить процедуру поиска и передачи данных в СУП и СПЗ в реальном масштабе времени. Решение задачи оперативного отображения информации на пульте ведущего физика сразу после окончания разряда также существенно упростится при выборке данных с требуемым временным разрешением напрямую из буферной памяти ПСД или из разделяемой памяти сервера сбора и архивирования данных третьего уровня ИИС.

После завершения разряда вся измерительная информация из БИПР переносится на третий уровень ИИС для сохранения в БДРИ на сервере архивирования и сбора данных. Для повышения скорости занесения информации в БДРИ предлагается сначала сохранять всю информацию с БИПР в разделяемой памяти сервера архивирования и сбора данных (разделяемая память ИИС). Разделяемая память ИИС используется, прежде всего, как промежуточный буфер для хранения данных, поступающих после проведения разряда из БИПР. Также она будет использоваться для обмена данными с СУТП, СС и СПЗ при сборе технологической информации и настройке параметров работы этих систем.

При сохранении данных из каждого БИПР в структуре разделяемой памяти ИИС используются отдельные (именованные) буферы. Программа сбора данных выделяет из поступающего по сети информационного потока информацию с соответствующего БИПР и заносит ее в этот именованный буфер. Структура буфера определяется используемым алгоритмом считывания записанных экспериментальных данных в БДРИ. В том случае, когда считывание выполняется после завершения передачи данных из БИПР, в буфере достаточно использовать один указатель. При выполнении считывания параллельно с осуществлением записи в буфере необходимо использовать второй указатель. Считывание данных из буфера в этом случае будет ограничено адресом нового указате-

ля, что не позволит выполнить чтение из области памяти, в которую еще не были записаны данные.

Структура именованных буферов в разделяемой памяти третьего уровня ИИС предпочтительно должна иметь тот же формат хранения экспериментальных данных, который используется в буферной памяти БИПР. Это позволит исключить задержки на переформатирование информации при ее записи в разделяемую память. Вместе с этим, для ускорения процедуры записи данных из разделяемой памяти в БДРИ поступающие из БИПР данные важно сгруппировать таким образом, чтобы форматы сохранения отдельных измеряемых значений легко конвертировались во внутренние форматы хранения данных БДРИ. Рассмотренные выше форматы хранения предусматривают эти возможности. Например, даже в случае записи информации с многоэлементного детектора – ПЗС-матрицы – появляется возможность адресовать не каждый отдельный пиксел, а массив данных, соответствующий одному временному срезу. Рассматриваемый массив может быть легко переформатирован во внутренний формат хранения данных БДРИ.

3.2.3. Структура конфигурационных данных ИИС. Содержание паспорта разряда

Управление работой диагностических и технологических систем токамака КТМ требует выполнения автоматического изменения настроек аппаратуры диагностических систем, измерительных каналов и параметров БИПР в соответствии с программой эксперимента (сценарием разряда). Для обеспечения этой функции на серверах третьего уровня ИИС предусмотрено создание структур конфигурационных данных оборудования САЭ КТМ. Совокупность конфигурационных данных, определяющих условия проведения очередного разряда, в экспериментальной практике токамаков называют также паспортом разряда. Данные паспорта разряда могут корректироваться от разряда к разряду в одном из трех режимов:

- 1) автоматически на основе результатов анализа экспериментальных данных;
- 2) вручную интерактивно оператором САЭ на основе результатов анализа текущего эксперимента и результатов предыдущих экспериментов;
- 3) задаваться на интервале межразрядной паузы по данным экспериментальной программы.

Конфигурационные данные – это главным образом изменяемые параметры ИИС, определяющие параметры диагностических систем и ПСД при проведении разряда, а также параметры работы технологических систем и систем управления, обеспечивающих пусковой режим функционирования стендового комплекса КТМ. Изменение конфигурационных данных должно осуществляться на интервале между разрядами.

Ниже приведен основной состав конфигурационных данных САЭ токамака КТМ.

[Общие параметры]

- Порядковый номер разряда
- Дата и время проведения разряда
- Шифр экспериментальной программы
- Целевые параметры плазмы

[Параметры диагностического комплекса в целом]

- Перечень диагностических подсистем

[Параметры диагностики N]

- Название диагностической системы
- Имя ответственного лица
- Время, коды и параметры запуска
- Условия и параметры останова
- Задержка включения (от начала разряда)
- Статус (задействована ли в текущем разряде)
- Геометрические параметры (прицельные параметры, коллимация и т. п.)

[Общие параметры ПСД N]

- Тип подсистемы
- Время (условие) старта N-го временного окна
- Время (условие) окончания N-го временного окна
- Частота дискретизации N-го временного окна
- Коды локальных событий, генерируемых ЦПУ подсистемы, сигналами dip и командами от ЦБС
- Временные метки ($t_1, t_2 \dots t_k$) – относительно момента t_0 – старт разряда
- Формат данных

[Параметры модуля в составе подсистемы N]

- Тип модуля (используемый драйвер, базовый адрес, номер прерывания IRQ, номер канала DMA)
- Коды (условия) запуска/останова – при индивидуальном управлении
- Диапазон входного сигнала
- Тип входного сигнала (дифференциальный/общий провод)
- Количество каналов
- Метод синхронизации
- Частота дискретизации
- Коэффициенты усиления (ослабления)
- Параметры встроенных фильтров (интеграторов)

[Параметры обработки данных]

- Номер устройства (канала), подлежащего обработке
- Состав функций предварительной обработки
- Параметры функций предварительной обработки
- Наименование типовых алгоритмов основной обработки данных
- Параметры типовых алгоритмов обработки данных

[Параметры отображения]

- Перечень параметров, отображаемых в пусковом режиме на пульте ведущего физика
- Характеристика формы отображения для N-го параметра

[Параметры СУП]

- Перечень параметров, передаваемых в СУП
- Цикл передачи N-го параметра в СУП
- Шифр закона управления формой (сценарий изменения формы)
- Шифр закона управления положением
- Шифр закона управления током (сценарий изменения тока)
- Шифр закона управления плотностью (сценарий изменения плотности)
- Шифр закона управления энергосодержанием (сценарий ввода ВЧ-мощности)

[Параметры сохранения данных]

- Имя в логической структуре БДРИ
- Тип сохраняемых данных

[Параметры безопасности]

- Параметры доступа к данным и средствам управления токамаком (группа/пользователь).

3.2.4. Перечень параметров, сохраняемых в базе данных результатов испытаний

Все параметры, значения которых формируются на выходе САЭ токамака КТМ, разделяются на две части по признаку сохранения в БДРИ: сохраняемые и не сохраняемые параметры.

В свою очередь, сохраняемые параметры разделяются на три группы:

- 1) результаты прямых измерений сигналов, формируемых датчиками физических диагностик;
- 2) результаты косвенных измерений (или вычисляемые плазмофизические параметры токамака КТМ);
- 3) технологические параметры, необходимые для анализа экспериментальных данных и коррекции сценариев проведения разрядов.

Перечни сохраняемых в БДРИ параметров приведены по группам в табл. 3.2.4.1–3.2.4.3.

Кроме перечисленных групп параметров, в БДРИ должна сохраняться информация о событийных сигналах, которые имели место в течение плазменного разряда и указывали на ключевые моменты его развития. Эта информация должна включать коды асинхронных и синхронных вычисляемых событий и соответствующие им метки времени. Перечень событийных сигналов, информация о появлении которых должна сохраняться в БДРИ, приведен в табл. 3.2.4.4. Типы полей данных и форматы данных, используемые при сохранении информации в базе, рассмотрены в п. 4.

Таблица 3.2.4.1

Перечень параметров прямых измерений

№ п/п	Название физической диагностики	Тип измеряемого параметра	Системное обозначение	Кол-во	Тип поля данных	Формат данных
1	Интерферометрия X-точки	интегральная плотность электронов <ne> вдоль хорды наблюдения	Xne.nl1 – Xne.nl32	32	таблица	float
2	ОИ-рефрактометр	<ne.0> – интегральная плотность вдоль центральной хорды, <ne.-1> – нижняя хорда, <ne.+1> – верхняя хорда	<ne.-1>, <ne.0>, <ne.+1>	3	сигнал	float
3	Многоканальный интерферометр (тангенциальный)	интеграл плотности электронов вдоль хорд наблюдения	ne.nl – ne.nl6	6	таблица	float
4	МГД-диагностика	тангенциальная составляющая полоидального поля по месту размещения МГД-зонда	mhd.1 – mhd.32	32	таблица	float
5	Высокоскоростная ИК-камера для измерения потоков в диверторе	распределение тепловых потерь в диверторной области	ik.cam	1	сигнал	image

Продолжение табл. 3.2.4.1

№ п/п	Название физической диагностики	Тип измеряемого параметра	Системное обозначение	Кол-во	Тип поля данных	Формат данных
6	Спектрометр высокого разрешения ВУФ-диапазона	спектр излучения вдоль выбранных хорд наблюдения	sp.high.1 – sp.high.10	10	таблица	spectr
7	Обзорный спектрометр ВУФ-диапазона	спектр излучения вдоль выбранных хорд наблюдения	sp.obz.1 – sp.obz.10	10	таблица	spectr
8	Спектрометр рекомбинационного рассеяния	интенсивность спектральных линий рекомбинации вдоль выбранных хорд наблюдения	sp.rec.1 – sp.rec.10	10	сигнал	float
9	Монитор Ha-Да	интенсивность спектральных линий Ha-Да вдоль хорд наблюдения	Ha-Da.1 – Ha-Da.10	10	сигнал	float
10	Обзорный болометр	интегральный поток излучения	bol.obz	1	сигнал	float
11	Корпускулярный анализатор	энергетический спектр нейтральных частиц	corp.1 – corp10	10	таблица	float
12	Рентгеновский монитор Те	интегральная температура электронов вдоль центральной хорды наблюдения	SXR.Te.1, SXR.Te.2, SXR.Te.3	3	сигнал	float
13	Рентгеновская томография	распределение интенсивности мягкого рентгеновского излучения по поперечному сечению вакуумной камеры	SXR.1 – SXR.128	128	таблица	float
14	Рентгеновский спектрометр	спектр рентгеновского излучения вдоль выбранных направлений наблюдения	SXR.sp.1 – SXR.sp.10	10	сигнал	float
15	ДЖРИ	HXR.1 – измерение быстрых изменений интенсивности HXR; HXR.2 – медленные изменения интенсивности HXR; HXR.3 – спектр излучения	HXR.1, HXR.2, HXR.3	3	сигнал	float

Продолжение табл. 3.2.4.1

№ п/п	Название физической диагностики	Тип измеряемого параметра	Системное обозначение	Кол-во	Тип поля данных	Формат данных
16	Двухчастотный РР	измерение положения границы плазмы и градиента плотности на границе	refl.1, refl.2	2	сигнал	float
17	Сканирующий РР	измерение профиля плотности $n_e(r)$	refl.3 – refl.12	10	сигнал	float
18	Камеры видеонаблюдения критических зон	механические характеристики внутренних стенок камеры и поверхности дивертора; интенсивность излучения в видимом спектральном диапазоне	V.cam.2 – V.cam.5	4	таблица	image
19	Высокоскоростная видеокамера наблюдения критических зон	динамика механических и тепловых процессов в области диверторных пластин	V.cam.1	1	сигнал	image
20	ЭМД	нормальная составляющая индукции полоидального поля (сечение A)	$B_p^n1... B_p^n32$	32	таблица	Float
		тангенциальная составляющая индукции полоидального поля (сечение A)	$B_p^\tau1... B_p^\tau32$	32	таблица	Float
		дивертор, нормальная составляющая индукции магнитного поля (сечение A)	$B_{pd}^n1... B_{pd}^n5$	6	таблица	Float
		дивертор, тангенциальная составляющая индукции магнитного поля (сечение A)	$B_{pd}^\tau1... B_{pd}^\tau5$	6	сигнал	Float

№ п/п	Название физической диагностики	Тип измеряемого параметра	Системное обозначение	Кол-во	Тип поля данных	Формат данных
		потокосые петли (группа А)	$\psi_s1(A) \dots \psi_s16(A)$	16	сигнал	Float
		потокосые петли (группа В)	$\psi_s1(B) \dots \psi_s16(B)$	16	сигнал	Float
		производная тока плазмы	$\Delta I_p1, \Delta I_p2$	2	сигнал	Float
		напряжение на обходе	$U_{p1} \dots U_{p10}$	10	сигнал	Float
		производная «ток плазмы + ток камеры»	$\Delta I_p + v(1), \Delta I_p + v(2)$	2	сигнал	float
		токи в обмотках PF (комплект А)	$I_{pf1(A)} \dots I_{pf10(A)}$	8	сигнал	float
		токи в обмотках PF (комплект В)	$I_{pf1(B)} \dots I_{pf8(B)}$	8	сигнал	float
		градиент магнитного потока в сечении А	$D\psi_{1(A)} \dots d\psi_{4(A)}$	4	таблица	float
		градиент магнитного потока в сечении В	$d\psi_{1(B)} \dots d\psi_{4(B)}$	4	таблица	float
		диамагнитный поток	$\delta\Phi1, \delta\Phi2$	2	таблица	float
		нормальная составляющая индукции полоидального поля (сечение В)	$B_p^n1 \dots B_p^n32$	32	таблица	float
		тангенциальная составляющая полоидального поля (сечение В)	$B_p^t1 \dots B_p^t32$	32	таблица	float
		дивертор, нормальная составляющая магнитного поля (сечение В)	$B_{pd}^n1 \dots B_{pd}^n5$	6	сигнал	float
		дивертор, тангенциальная составляющая индукции магнитного поля (сечение В)	$B_{pd}^t1 \dots B_{pd}^t5$	6	сигнал	float

Таблица 3.2.4.2

*Перечень параметров косвенных измерений
(вычисляемые плазмо-физические параметры)*

Наименование параметра	Системное обозначение	Тип поля данных	Формат данных
Ток плазмы	I_p	сигнал	Float
Положение плазмы по вертикали	Z	сигнал	Float
Форма плазмы	$\Gamma(r, z)$	таблица	Array
Энергосодержание плазмы	W_p	сигнал	Float
Напряжение на обходе	U_p	сигнал	Float
Тороидальное поле	B_t	сигнал	Float
Профиль плотности электронов	$n_e(r, z)$	таблица	Array
Профиль температуры электронов	$T_e(r, z)$	таблица	Array
Профиль полной излучаемой мощности	$P(r, z)$	таблица	Array
Профиль температуры ионов	$T_i(r, z)$	таблица	Array
Профиль интенсивности мягкого рентгеновского излучения	$I_{srx}(r, z)$	таблица	Array
Эффективный заряд плазмы	Z_{eff}	сигнал	Float
Амплитуда 2-й моды МГД-возмущений	$B_{2мгд}$	сигнал	Float
Профиль тока	$J_p(r, z)$	таблица	Array
Профиль запаса устойчивости	$q(r)$	таблица	Array

Таблица 3.2.4.3

Перечень параметров прямых измерений

№ п/п	Название технологической системы	Тип измеряемого параметра	Системное обозначение	Кол-во	Тип поля данных	Формат данных
1	ВЧ-генератор	проходящая мощность	$P_{пр1.1} \dots, P_{пр1.4} \dots P_{пр4.4}$	16	таблица	int
		отраженная мощность	$P_{отр1.1} \dots, P_{отр1.4} \dots P_{отр4.4}$	16	таблица	int
		пиковое напряжение на антенне	$U_{ант1} \dots U_{ант4}$	4	сигнал	int
		частота ВЧ-излучения	$f_{г1} \dots f_{г4}$	4	сигнал	int
		ток анода генераторных ламп	$I_a1 \dots I_a4$	4	сигнал	int

Окончание табл. 3.2.4.3

№ п/п	Название технологической системы	Тип измеряемого параметра	Системное обозначение	Кол-во	Тип поля данных	Формат данных
2	ЭМС	токи в обмотках PF (комплект А)	$I_{pf1(A)} \dots I_{pf6(A)}$	6	сигнал	int
		токи в обмотках PF (комплект В)	$I_{pf1(B)} \dots I_{pf6(B)}$	6	сигнал	int
		ток в обмотке CS	I_{cs}	2	сигнал	int
		ток в обмотке HFC	I_{hfc}	4	сигнал	int
		ток в обмотке TF	I_{tf}	2	сигнал	int
		напряжение на обмотках PF	$U_{pf1} \dots U_{pf6}$	6	таблица	int
		напряжение на обмотке CS	U_{cs}	1	сигнал	int
		напряжение на обмотке HFC	U_{hfc}	1	сигнал	int
		напряжение на обмотке TF	U_{tf}	1	сигнал	int
3	Система газонапуска	расход водорода	Q_{H2}	1	сигнал	int
		расход дейтерия	Q_{D2}	1	сигнал	int
4	Анализатор остаточных газов	спектр остаточных газов по массам	AEM.sp	1	таблица	int
5	Система контактной термометрии	температура стенок вакуумной камеры	$T_{BK1} \dots T_{BK92}$	92	таблица	int
6	Система контактной тензометрии	механические напряжения в обмотках ЭМС	$S_{emc1} \dots S_{emc80}$	80	таблица	int
		механические напряжения в элементах конструкции	$S_{BK1} \dots S_{BK10}$	10	таблица	int
7	СУП	задания к системам цифрового управления ИП обмоток ЭМС	$I_{pf1-зад} \dots I_{pf6-зад}, I_{cs-зад}, I_{hfc-зад}, I_{tf-зад}$	9	таблица	int
		задания к контроллеру управления клапанами оперативного газонапуска	$Q_{задH2}, Q_{задD2}$	2	сигнал	int

Таблица 3.2.4.4

Перечень событийных сигналов, сохраняемых в БДРИ

Наименование событийного сигнала	Системное обозначение	Тип поля данных	Формат данных
Начало разряда	start_discharge	событие	byte
I_{tf} достиг заданного уровня ($I_{tf} = I_{tf-зад}$)	ltf_target	событие	byte
I_{cs} достиг заданного уровня ($I_{cs} = I_{cs-зад}$)	lcs_target	событие	byte
Начало фазы быстрого изменения тока в индукторе	lcs_invert	событие	byte
Начало фазы медленного изменения тока в индукторе ($U_{cs} = \max\{U_d - cs\}$)	lcs_rate2	событие	byte
Появление плазменного шнура ($I_p = \min\{I_p\}$)	l _{p_0}	событие	byte
Включение программируемого напуска газа	gas_poof	событие	byte
Ток плазмы I_p достиг заданного значения ($I_p = I_{зад}$)	Plato_l _p	событие	byte
Включить ВЧ-генераторы	ICR_switch_on	событие	byte
Значение параметра $li/2$ превысило пороговое значение	li/2_level1	событие	byte
Температура ионов T_i достигла порогового значения	Ti_level1	событие	byte
Достигнуто минимально возможное значение тока в индукторе	lcs_min	событие	byte
Сигнал инициации останова разряда	shutdown	событие	byte

3.2.5. Структура базы данных результатов испытаний

Традиционным вариантом сохранения экспериментальной информации в БДРИ является размещение всех данных, получаемых от подсистем САЭ в процессе плазменных разрядов, в виде дерева каталогов. Такая организация базы данных (рис. 3.2.5.1) исторически сложилась на токамаках, поскольку является наиболее наглядным и простым представлением информации на магнитных носителях ЭВМ. В частности, программный комплекс MDSplus, специально разработанный для систем сбора данных токамаков и используемый уже более 10-ти лет на таких установках, как C-MOD, DIII-D (США), RFX (Италия), TCV (Швейцария) и др., обеспечивает именно такую структуру БДРИ [32, 52, 53].

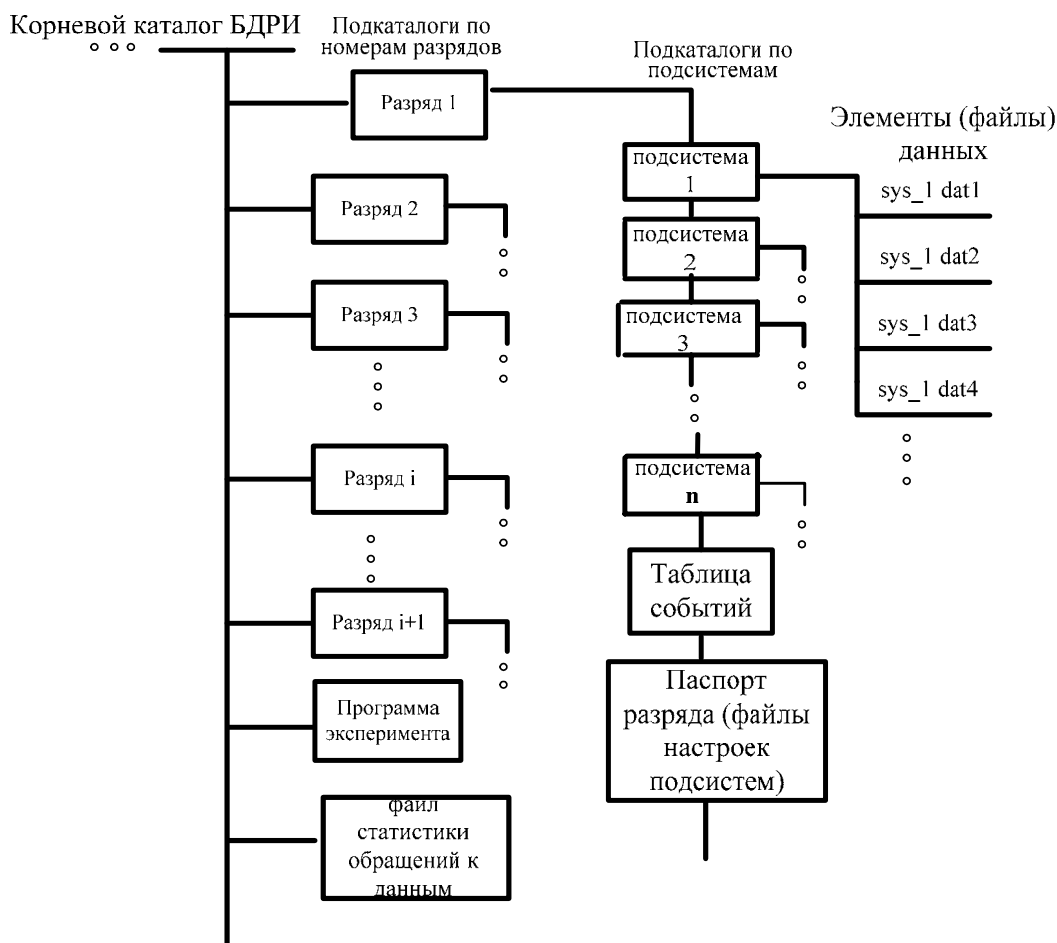


Рис. 3.2.5.1. Реализация БДРИ на основе файловой системы

В рассматриваемом случае БДРИ фактически имеет каталоговую структуру, в которой выделяются следующие элементы.

1. Корневой каталог БДРИ, который содержит подкаталоги, соответствующие отдельным плазменным разрядам, файл статистики обращений к элементам данных, используемый в дальнейшем программой управления процессом архивирования экспериментальной информации, а также другую общую для конкретного эксперимента информацию, например программу эксперимента. В общем случае корневой каталог может быть разделен на подкаталоги, соответствующие отдельным экспериментам или экспериментальным кампаниям.

2. Подкаталоги по номерам разрядов. Каждый из таких подкаталогов содержит полную информацию о соответствующем разряде и включает, помимо подкаталогов с данными по отдельным подсистемам САЭ, диагностическим системам или группам плазмо-физических параметров, файл событийных сигналов и файл или подкаталог паспорта разряда. Файл событийных сигналов формируется в соответствии с перечнем, приведенным в табл. 3.2.4.4.

3. Подкаталоги по подсистемам содержат непосредственно сами элементы (файлы) данных, собранные и сохраненные в базе в результате проведения плазменного разряда.

Преимуществом такой организации БДРИ, наряду с наглядностью представления данных на магнитных носителях ЭВМ, является возможность использования для управления данными стандартных средств работы с файлами, поддерживаемых ОС сервера. В качестве недостатка БДРИ, основанной на файловой системе, необходимо отметить ограниченный набор возможностей по управлению элементами данных, сохраненных в отдельных файлах БДРИ. Фактически в составе ОС отсутствуют средства работы с данными внутри файлов. Поэтому такие функции, как поиск данных в БДРИ по какому-либо признаку, выборка данных из БДРИ, соответствующих заданному интервалу времени и др., могут быть реализованы путем разработки специальных программных модулей.

При помощи структуры БДРИ, основанной на системе каталогов, входные потоки данных могут быть систематизированы, и может быть обеспечен быстрый доступ к запрашиваемым данным с помощью функций поиска необходимых каталогов и файлов по номеру подсистемы и имени параметра. Но нужно учитывать, что для обработки запросов пользователей на получение необходимой информации из БДРИ, а также для записи новых данных в базу потребуется разработка специальной программы. Обращение к базе будет происходить с помощью запросов к серверу БДРИ вида:

`read_data <номер разряда_номер подсистемы_имя параметра>` – чтение данных,

`wr_data < номер разряда_номер подсистемы_имя параметра>` – запись данных.

Следует отметить, что изначально основными функциями программного комплекса MDSplus по работе с базой экспериментальных данных были функции названного типа.

Кроме отмеченного по мере роста БДРИ развития диагностического комплекса токамака и расширения типов и структур данных, используемых в практике исследований, будут усугубляться проблемы по управлению данными, расположенными в многочисленных каталогах и файлах. Вследствие отмеченного при создании баз экспериментальных данных на токамаках стали применяться для структурирования данных более эффективные модели и средства управления данными, в частности реляционные СУБД.

Вариант структуры БДРИ токамака КТМ, в которой использованы табличные (реляционные) формы представления данных, приведен на рис. 3.2.5.2. Главная таблица БДРИ в этом случае содержит столбец но-

меров разрядов и столбцы по соответствующим подсистемам диагностического комплекса КТМ. Содержимое ячеек главной таблицы представляет собой ссылки на таблицы результатов прямых измерений диагностических параметров и таблицы других данных, которые сохранены для соответствующей подсистемы. Ячейки главной таблицы могут содержать также ссылки на файлы конфигурационных данных и файлы, содержащие другую вспомогательную информацию.

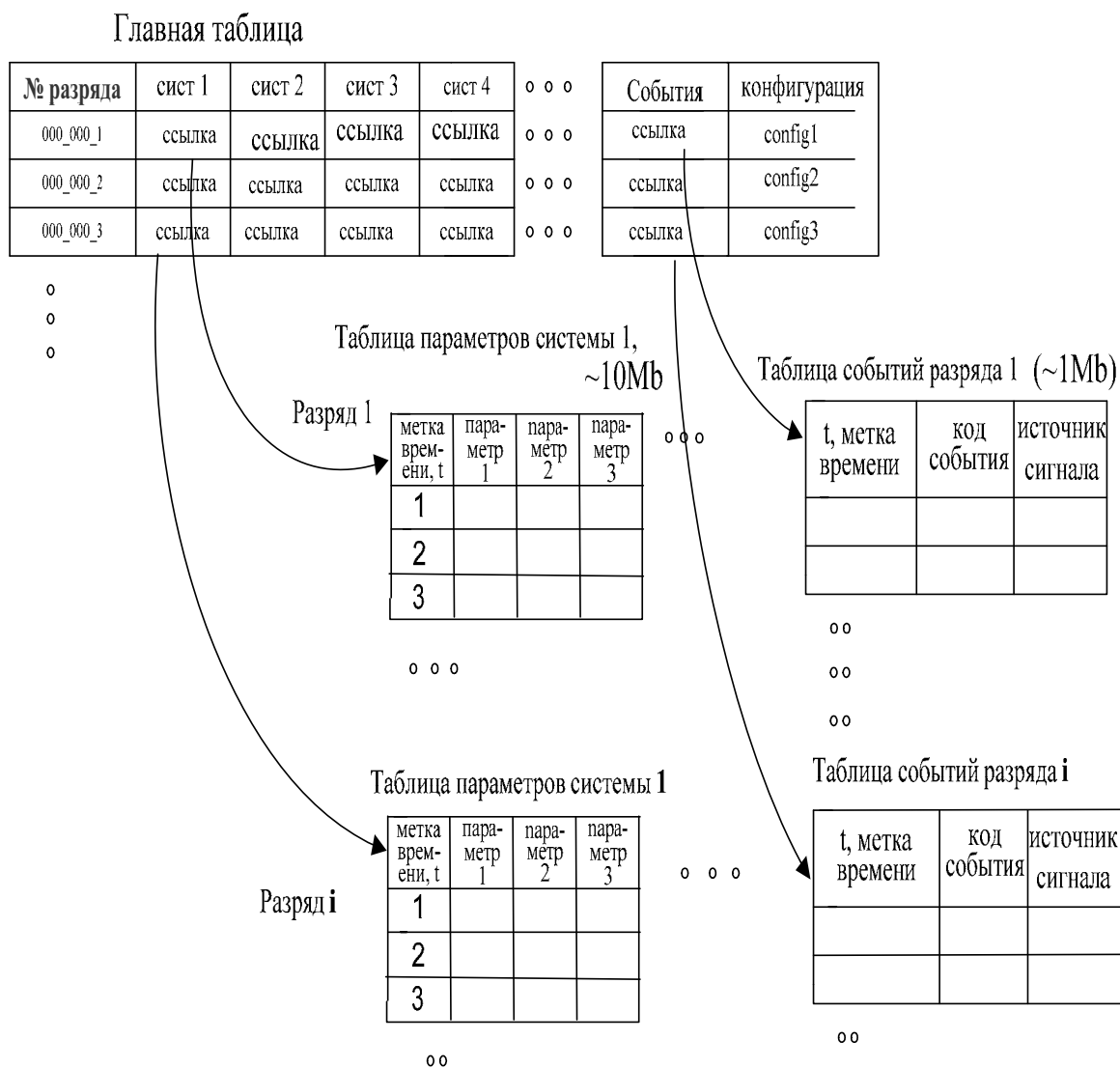


Рис. 3.2.5.2. Реализация БДРИ на основе реляционной модели данных

Попробуем определить, какая из структур наиболее эффективна в случае БДРИ. Преимущества БДРИ реляционного типа очевидны при размещении результатов измерений событийных сигналов, формируемых в виде 8-мибитного кода (табл. 3.2.4.4). В этом случае все событийные сигналы, произошедшие в течение разряда, могут быть сохранены в одной реляционной таблице вида (рис. 3.2.5.3):

Метка времени	Код события	Дополнительные данные
сек_мсек_мксек	ВКЛ	

Рис. 3.2.5.3. Структура таблиц событийных сигналов

Такой вид представления обеспечит быстрый поиск событий по заданному коду, возможность сортировки и выборки событий с помощью средств реляционных СУБД.

Более сложной является ситуация при сохранении данных от датчиков и диагностических систем, преобразующих непрерывно меняющиеся параметры в электрические сигналы. Результаты прямых измерений таких сигналов представляют собой временные последовательности, называемые также векторами данных. Параметры, перечисленные в табл. 3.2.4.1–3.2.4.3, при сохранении будут представлять именно такие последовательности.

При сохранении векторов данных в табличной форме, как показано на рис. 3.2.5.2, мы сталкиваемся с тем, что при создании таблицы с данными, полученными с разной частотой, возникает разреженность таблиц. Это увеличивает размеры таблиц из-за необходимости хранения пустых элементов и, следовательно, приводит к непродуктивному росту объема БДРИ. Избежать данной проблемы можно путем разнесения векторов данных, полученных с различными частотами временной дискретизации, по отдельным таблицам. Но такое решение приведет к усложнению структуры БДРИ, увеличению количества таблиц в базе, и, как следствие этого, увеличится время обработки запросов к БДРИ. Усложнение структуры БДРИ повлечет за собой усложнение алгоритмов обработки запросов, а также формы выражений, в которых записываются сами запросы.

Таким образом, каждая из рассмотренных структур БДРИ имеет свои недостатки. Но при этом файловая организация базы обеспечивает наглядное иерархическое представление экспериментальных данных токамака, которое наилучшим образом соответствует характеру потоков данных в ИИС и специфике проведения плазменных разрядов, а использование табличных форм представления данных в базе позволяет применять стандартные средства реляционных СУБД.

В результате можно сделать вывод, что при проектировании БДРИ должны использоваться оба подхода к структурированию данных. Причем если проанализировать современное развитие комплекса MDSplus, наиболее широко используемого в термоядерных исследованиях, то можно заметить, что в данной программной системе в качестве основ-

ной поддерживается, как это и было изначально, иерархическая древо-видная структура, элементами которой являются файлы, а сами экспериментальные данные имеют структуру таблиц. При этом для управления базой данных широко используются средства современных реляционных СУБД, в частности, современные версии MDSplus имеют развитые программные интерфейсы для сопряжения с реляционными СУБД.

Далее с учетом проведенных рассуждений будут рассмотрены вопросы логического проектирования БДРИ, алгоритмы работы системы управления базой и вопросы их программной реализации.

3.3. Пользовательский интерфейс представления данных ИИС

Одной из основных функций системы ИИС КТМ является реализация графического интерфейса представления информации на экране пульта ведущего физика, на панелях коллективного пользования с использованием разнообразных форм отображения и графических мнемосхем, а также интерфейса представления экспериментальной информации на рабочих станциях исследователей. При этом предполагается, что формируемые на экране формы представления экспериментальных данных могут быть перенесены на бумажный носитель в виде отчетов и протоколов по результатам проведения разрядов.

3.3.1. Перечень плазмо-физических параметров для представления оператору (ведущему физику) ИИС

Состав отображаемых при анализе параметров, зависимостей и функций распределения определяется индивидуально ведущим физиком и может существенно изменяться в зависимости от программы экспериментов и особенностей протекания разряда. С учетом этого в ИИС обеспечивается возможность отображения любого результата прямых измерений, сохраненного в БДРИ согласно перечню (см. табл. 3.2.4.1), на пульте ведущего физика, а также параметров и пространственно-временных распределений согласно перечню табл. 3.2.4.2, полученных в результате выполнения типовых и специальных алгоритмов обработки экспериментальных данных. При этом формы представления экспериментальных данных должны предусматривать возможность отображения вспомогательной информации об изменении параметров технологических систем и кодов событий, которые имели место в течение разряда, согласно табл. 3.2.4.3 и 3.2.4.4.

При этом следует подчеркнуть, что одновременно на пульте ведущего физика будет отображаться относительно небольшое количество параметров и функциональных зависимостей, что определяется эргономическими требованиями к представлению информации с целью обес-

печения оптимальных условий для ее восприятия человеком. Однако это ни в коем случае не является недостатком, т. к. спроектированный графический интерфейс ИИС должен обеспечивать возможность простой переконфигурации форм отображения и изменения состава отображаемых параметров и осуществить их визуальное представление.

Интерфейсы представления информации на рабочих станциях ИИС специально не регламентируются, поскольку исследователями для работы могут быть использованы как типовые алгоритмы обработки и представления данных, применяемые ведущим физиком ИИС, так и программные модули и алгоритмы собственной разработки.

3.3.2. Общие требования к представлению данных на пульте ИИС

ИИС КТМ предъявляет повышенные требования к функциям визуализации экспериментальных данных как в режиме послеэкспериментальной обработки, так и в реальном масштабе времени проведения экспериментов. Многие параметры исследуемых процессов в ИИС КТМ описываются достаточно сложными функциями, зависящими и от пространственных, и от временных координат. Графическое представление таких функций с хорошим пространственным и временным разрешением, с возможностью гибкого изменения величины разрешения является сложной задачей.

Графический интерфейс пульта ведущего физика должен обеспечивать оперативное отображение важных для хода эксперимента параметров, сочетая наиболее полное представление информации об эксперименте и удобство пользования. Можно сформулировать следующие общие требования к графическому интерфейсу токамака КТМ. Интерфейс должен обеспечивать:

- высокую скорость вывода информации на экран пульта ведущего физика и ее обновления;
- наглядность представления экспериментальной информации, возможность быстрого восприятия отображаемой информации;
- исключение ошибок при работе оператора;
- однозначность интерпретации оператором измеряемых параметров;
- возможность оперативного изменения состава отображаемых параметров путем использования меню настроек и команд конфигурирования интерфейса;
- возможность управления отдельными формами отображения информации, в частности, направленного на изменение характеристик осей временной координаты для векторов измерения, осей пространственных координат для многомерных функциональных зависимостей, величины спектрального разрешения для спектральных зависимостей.

При разработке графического интерфейса пульта ведущего физика предлагается руководствоваться требованиями к расположению информации на экране, требованиями к формам представления информации и способам «кодирования» информации, а также общими эргономическими требованиями, предъявляемыми к мнемосхемам, согласно ГОСТ 21480-76.

3.3.3. Формы представления данных на пульте ведущего физика и панелях коллективного пользования

Для представления информации на пультах управления и панелях коллективного пользования с учетом современных решений по созданию аналогичных систем для зарубежных токамаков предлагается использовать многоэкранную иерархическую структуру форм отображения, в которой элементы информации группируются по следующим признакам:

- принадлежность к диагностической аппаратуре;
- принадлежность к исследуемым в плазме процессам;
- принадлежность к технологическим системам и процессам;
- принадлежность к результатам обработки данных.

Информация на пульте ведущего физика для наглядности восприятия информации отображается преимущественно в графической форме. На КТМ.03.001.013.ТП представлена видеодиаграмма главного экрана пульта ведущего физика. В заголовке главного экрана отображается текущее время и номер разряда, астрономическое время, параметры экспериментального времени, в котором проводится разряд, и набор форм отображения для основных плазмо-физических параметров, которые были достигнуты в разряде.

При этом к основным параметрам, характеризующим плазменный разряд, относятся ток плазмы, плотность плазмы, температура электронов и ионов, запас устойчивости, энергосодержание, бета-полоидальное, мощность омического нагрева, мощность ВЧ-нагрева, индукция тороидального поля; индукция полоидального поля; полоидальный магнитный поток; координата центра плазмы в направлении большого радиуса плазмы.

В левой части главного экрана в цифровой форме отображаются экстремальные значения основных параметров, состав которых также может быть изменен ведущим физиком, причем отображаются не только текущие значения, но и заданные значения параметров, которые планируется достичь в текущем разряде.

Справа от колонки параметров отображается диаграмма, показывающая положение плазменного шнура в пространстве. Рядом с ней в цифровой форме показаны временные зависимости для основных параметров: ΔZ_p – величина смещения плазменного шнура по вертикали относительно заданного центра плазмы, R_p – координата центра плазмы в

направлении большого радиуса плазмы, I_p – ток плазмы. Внизу экрана, в правой его части, расположено пользовательское меню. Остальное место занимают временные зависимости для параметров, выбранных ведущим физиком в соответствии со сценарием разряда. На каждом из графиков отображается текущая величина параметра и его буквенное обозначение. Масштаб и расположение графиков в пространстве экрана можно при необходимости изменять.

В пользовательском меню существует пункт «Экран», с помощью которого производится переключение между экранами пульта ведущего физика.

Второй экран пульта ведущего физика, представленный на рис. 3.3.3.1, предназначен для одновременного просмотра множества параметров при помощи временных зависимостей. Также на этом экране при помощи пользовательского меню, расположенного в правой части экрана, можно задать состав временных зависимостей, которые будут отображаться на главном экране.

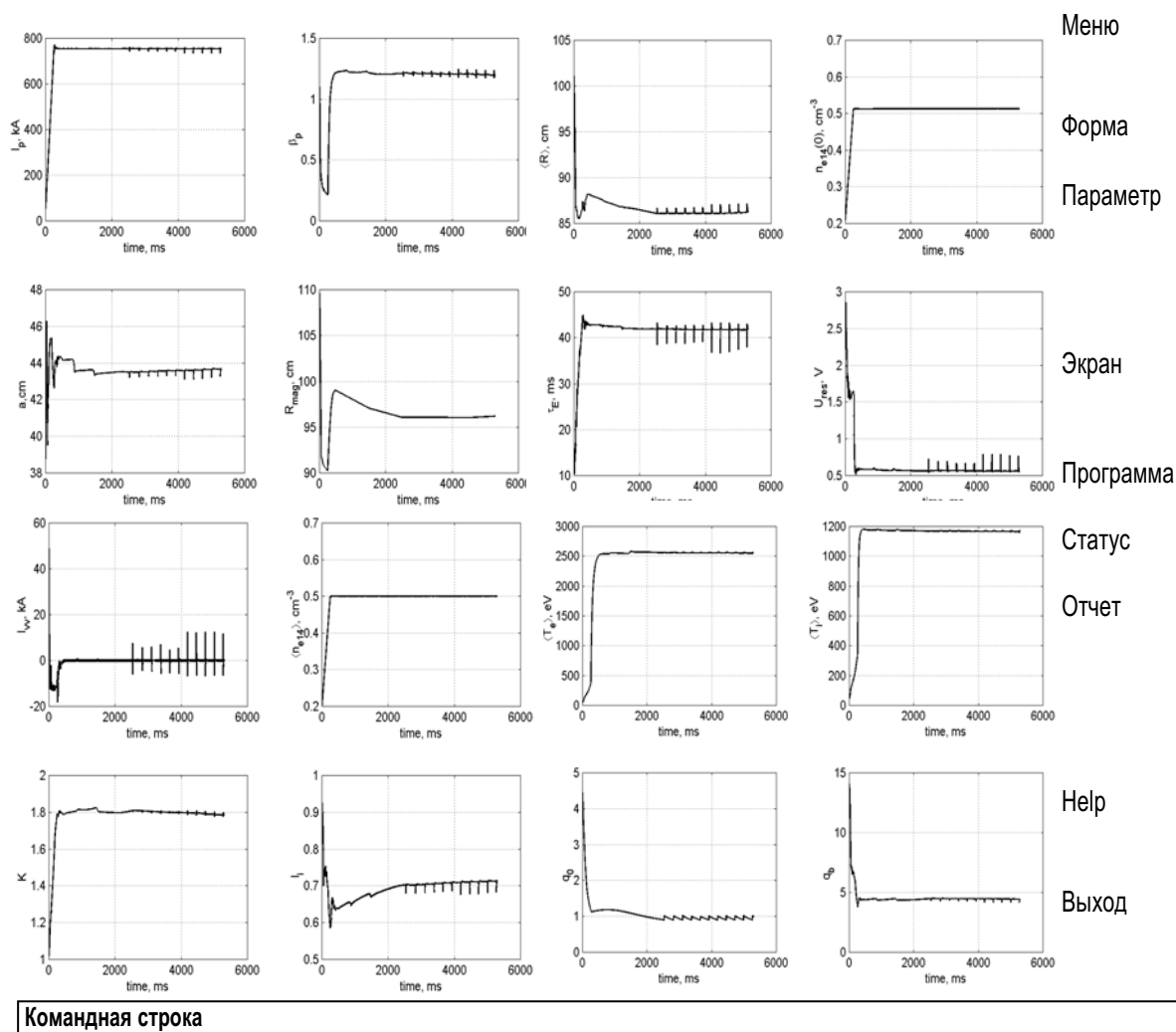


Рис. 3.3.3.1. Видеограмма пульта ведущего физика (экран 2)

Использование интерфейса командной строки предусмотрено для возможности оперативного задания параметров отображения, таких как масштабы временных и пространственных осей, выбор отображаемых параметров, амплитуда параметра, а также для выполнения более сложных действий по настройке и управлению формами отображения.

Кроме этого, с помощью команд предусматривается оперативное изменение и настройка алгоритмов первичной обработки и алгоритмов основной обработки для выбранных параметров.

На третьем экране пульта ведущего физика, представленном на рис. 3.3.3.2, отображаются пространственно-временные распределения таких параметров плазмы, как профиль плотности тока $J(r, t)$ – верхняя левая диаграмма; изолинии магнитного потока $\Psi(r, z, t)$ – диаграмма справа; положение внешней граничной поверхности плазмы $\Gamma(r, Z, t)$ – диаграмма внизу и др.

На экране 3 скомпонованы формы отображения для многомерных зависимостей. В данном случае также обеспечивается интерфейс командной строки.

Для удобства работы оператора имеется возможность быстрого обращения к справочной документации при помощи пункта «Help».

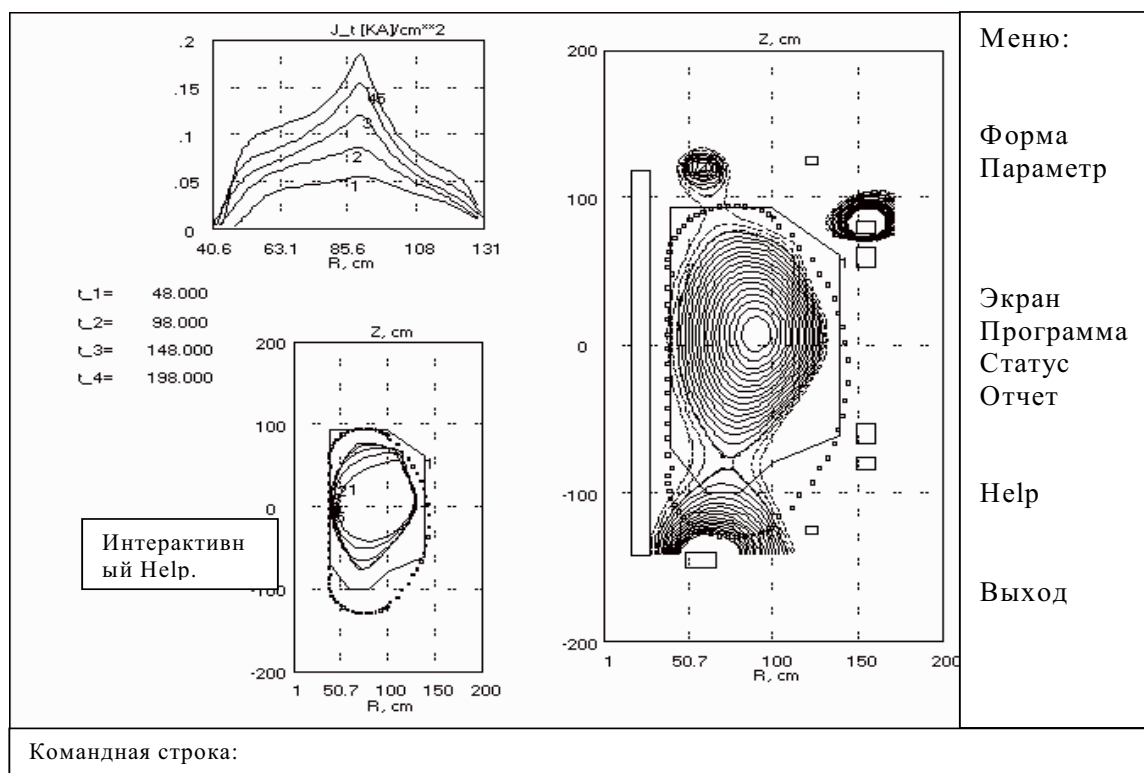


Рис. 3.3.3.2. Видеограмма пульта ведущего физика (экран 3)

3.4. Интерфейсы и протоколы передачи данных ИИС

3.4.1. Интерфейсы для подключения блоков измерения, первичной обработки и регистрации к диагностическим системам

ИИС КТМ является многоуровневой иерархической системой сбора данных, на втором уровне которой расположены блоки измерения и первичной регистрации, получающие информацию от диагностических систем, размещенных на первом уровне ИИС и выполняющих первичное преобразование параметров плазмы и технологических процессов.

Выбор интерфейсов для подключения БИПР, прежде всего, определяется типом диагностической системы. В зависимости от особенностей проведения измерений вся диагностическая аппаратура разделена на три группы. В группу А выделены пассивные, т. е. не предполагающие каких-либо воздействий на измеряемую среду, диагностики малой степени сложности. В состав этих диагностик входит большое количество относительно простых однотипных детекторов и предусилителей, формирующих нормированный сигнал, который передается в систему сбора данных. К таким диагностикам можно отнести ЭМД, ДКТ и ДТМ, диагностику многоканальной болометрии.

К диагностикам группы В отнесены пассивные диагностики, представляющие собой сложные физические приборы. В качестве примера таких систем можно привести анализатор остаточных газов, ДЖРИ, корпускулярный анализатор, спектрометры ВУФ-диапазона, ИК-камеры и видеокамеры наблюдения критических зон, монитор На-Да излучения, корпускулярный анализатор. Для подключения этих диагностик, помимо использования электрических кабельных интерфейсов с унифицированным представлением аналоговых измерительных сигналов, предпочтительнее применять стандартные цифровые интерфейсы передачи данных, такие как приборный интерфейс GPIB, Camera Link и др. В этом случае диагностика разрабатывается в виде прибора, имеющего встроенные микропроцессорные блоки управления и обработки сигналов.

Диагностики группы С – это активные диагностические системы, имеющие аналогичную по сложности в диагностических системах группы В реализацию трактов измерения диагностируемых параметров, но включающие помимо этого управляемые источники сигналов различной физической природы. В качестве таких источников выделяются СВЧ-генераторы (на частоты 20–65 ГГц), твердотельные и CO₂-лазеры, субмиллиметровый лазер на жидких красителях или СВЧ-генератор (160 ГГц), диагностический инжектор пучков нейтральных частиц (в диагностический комплекс КТМ не включен). На токамаке КТМ к активным диагностикам относятся ОИ, РР, многоканальный интерферометр,

интерферометр Х-точки. В активных диагностиках выполняется ВЧ-модуляция зондирующего излучения с последующим его вводом в плазму. Параметры взаимодействия излучения с плазмой при этом регистрируются. Помимо стандартного интерфейса передачи данных для перечисленных диагностик должны быть реализованы специализированные интерфейсные соединения для передачи синхросигналов и сигналов управления диагностической аппаратурой. Например, для РР и ОИ-рефрактометра такими сигналами будут являться сигналы управления вводом СВЧ-излучения в плазму.

Информация о типах интерфейсов, предлагаемых для подключения диагностической аппаратуры к БИПР, приведена в табл. 3.4.1.1.

Таблица 3.4.1.1

Типы интерфейсов с диагностической аппаратурой

Тип диагностики	Тип интерфейса	Характеристики интерфейса
Диагностики группы А	аналоговый интерфейс передачи нормированных электрических сигналов	многожильные кабели с индивидуально экранированными витыми парами и общим экраном (STP); коаксиальные линии связи марки РК, РС, РД; параметры сигналов – нормированные сигналы тока (4–20 мА) и напряжения (0–5 В)
	интерфейс электрического питания диагностической аппаратуры	кабели низковольтных цепей питания (0–24 В)
Диагностики группы В	аналоговый интерфейс передачи нормированных электрических сигналов	многожильные кабели с индивидуально экранированными витыми парами и общим экраном (STP); коаксиальные линии связи марки РК, РС, РД; нормированные сигналы тока (4–20 мА) и напряжения (0–5 В)
	интерфейс электрического питания диагностической аппаратуры	кабели низковольтных цепей питания (0–24 В), высоковольтные кабели питания (0–2 кВ)
	цифровой интерфейс передачи данных, среда передачи – многожильный кабель, оптоволоконная линия	Camera Link, GPIB, LVDS, Ethernet 100BaseFX, Profibus, RS-232/422/485 и др.

Тип диагностики	Тип интерфейса	Характеристики интерфейса
Диагностики группы С	аналоговый интерфейс передачи нормированных электрических сигналов	многожильные кабели с индивидуально экранированными витыми парами и общим экраном (STP); коаксиальные линии связи марки РК, РС, РД; нормированные сигналы тока (4–20 мА) и напряжения (0–5 В)
	интерфейс электрического питания диагностической аппаратуры	кабели низковольтных цепей питания (0–24 В)
	цифровой интерфейс передачи данных, среда передачи – многожильный кабель, оптоволоконная линия	Camera Link, GPIB, LVDS, Ethernet 100BaseFX, Profibus, RS-232/422/485 и др.
	цифровой интерфейс передачи синхросигналов	среда передачи – пластиковое оптоволокно POF
	аналоговый интерфейс передачи по оптоволоконным линиям связи	среда передачи – кварцевое оптоволокно

3.4.2. Интерфейсы и протоколы межуровневой передачи данных ИИС

К интерфейсам межуровневой передачи данных ИИС относятся интерфейсы между вторым и третьим, третьим и четвертым уровнями ИИС, а также интерфейсы со смежными системами САЭ КТМ, такими как СУП, СС и СПЗ.

Второй уровень ИИС представлен ПСД диагностических систем, основой которых является один или несколько БИПР. Каждый БИПР, с одной стороны, имеет интерфейсы связи с диагностическим оборудованием, а с другой – подключен к третьему уровню ИИС. В качестве единого интерфейса подключения к третьему уровню ИИС используется интерфейс Ethernet 100 Мбит/с с оптической средой передачи. В настоящее время рассматриваются два альтернативных варианта реализации оптоволоконной среды передачи. Первый вариант предполагает использование оптоволоконной среды передачи со стеклянной сердцевиной – стандарт Ethernet 100BaseFX. В целях удешевления проекта также рассматривается вариант использования пластикового оптоволоконного кабеля, обеспечивающего скорость передачи 100 Мбит/с. Основным аргументом выбора ин-

терфейса Ethernet является очень большой объем ежегодно выпускаемого Ethernet оборудования (что привело к существенному снижению цен по сравнению с сетевым оборудованием, имеющим аналогичные технические характеристики), а также наличие большого выбора одноплатных ЭВМ, промышленных компьютеров и микропроцессорных устройств, поддерживающих этот интерфейс.

Для ПСД, информация с которых используется в контурах управления плазмой, предусмотрена реализация цифрового интерфейса последовательной передачи данных, физическая среда передачи которого выполнена на базе оптоволоконной линии связи. Анализ существующих технических решений на современных термоядерных установках типа токамак позволил сделать предварительный вывод, что скорость передачи интерфейса Ethernet 100BaseFX является достаточной для выполнения алгоритмов цифрового управления плазмой.

Данные предположения требуют экспериментальной проверки, которая будет выполняться на этапе макетирования проектных решений.

Все БИПР ПСД второго уровня ИИС имеют интерфейс связи с ЦБС. Связь с ЦБС обеспечивает привязку работы всех подсистем к единому времени эксперимента и синхронизацию выполнения сбора данных в соответствии с фазами разряда и режимами работы КТМ.

На стороне БИПР синхросигналы принимаются ЛМС. В качестве физической среды передачи выбрано пластиковое оптоволокно, обеспечивающее большую легкость при монтаже по сравнению с оптоволоконным на основе стекловолокна.

Для ПСД, информация с которых используется в СПЗ, выделен отдельный физический интерфейс передачи сигналов. Это необходимо для обеспечения детерминированного времени передачи кодов аварийных событий на верхний уровень СПЗ. В качестве интерфейса передачи аварийных сигналов в ИИС КТМ намечено использование интерфейса Ethernet 100 Мбит/с, реализуемого на физическом уровне с использованием стекловолоконной или пластиковой оптоволоконной линии связи.

Аппаратные интерфейсы третьего и четвертого уровней ИИС используются для межуровневой передачи данных по высокоскоростным, последовательным каналам связи, для представления данных в пультовой эксперимента с использованием специализированных средств отображения и организации канала связи с WEB-сервером. При выполнении связи третьего и второго уровней ИИС используется Ethernet 100BaseFX сеть, построенная на базе сетевого коммутатора ИИС и имеющая звездообразную топологию. Информация из смежных систем, таких как СУП, СПЗ и СС, также поступает на третий уровень ИИС и вводится через сетевой коммутатор Ethernet верхнего уровня САЭ.

При выполнении передачи буферизируемой в памяти БИПР информации на третий уровень ИИС первоочередным моментом является формализация правил построения кадра запроса, формируемого сервером к БИПР, и ответного кадра, получаемого сервером от БИПР.

Предлагается следующий протокол кадра запроса (рис. 3.4.2.1).

Команда	Подсистема	Имя переменной	Номер переменной	Значение переменной	Флаг 1	Флаг 2	Флаг 3	Флаг 4
String	String	String	String	String	String	String	String	String

Рис. 3.4.2.1. Формат кадра запроса БИПР

В кадре запроса содержатся следующие информационные поля.

- Команда – управляющая команда может быть «R» – команда «Read», чтение переменной (параметра); «W» – команда «Write», запись нового значения переменной (параметра) в контроллер; «G» – команда «Get», запрос списка доступных подсистем (контроллеров); «V» – команда «Vecto», запрос вектора значений.
- Подсистема – имя подсистемы (контроллера), от которой необходимо получить данные.
- Имя переменной – имя запрашиваемой у контроллера переменной.
- Номер переменной – номер запрашиваемой у контроллера переменной.
- Значение переменной – значение переменной (параметра), поле заполняется в случае, если выполняется команда «Write», при других командах оно игнорируется.
- Флаг 1, Флаг 2, Флаг 3, Флаг 4 – зарезервированные в протоколе места для возможности функционального расширения системы (имя архива, время опроса и др.).

Поля передаваемого кадра запроса разделяются символом « | ».

БИПР, приняв запрос, анализирует его, обрабатывает и отправляет ответный кадр в следующем формате (рис. 3.4.2.2).

Подсистема	Команда	Имя переменной	Номер переменной	Значение переменной	Флаг 1	Флаг 2	Флаг 3	Флаг 4	Флаг 5
String	String	String	String	String	String	String	String	String	String

Рис. 3.4.2.2. Формат кадра ответа БИПР

Ответный кадр состоит из следующих информационных полей.

- Подсистема – подсистема (контроллер), от которой получено значение переменной (параметра).
- Имя переменной – имя передаваемой переменной (параметра).
- Номер переменной – номер передаваемой переменной (параметра).
- Значение переменной – значение переменной (параметра) при запросе значения переменной по команде «Read» или вектор значений, полученный по команде «Vector». Вектор содержит значения переменной, разделенные символом «!».
- Флаг 1, Флаг 2, Флаг 3, Флаг 4, Флаг 5 – зарезервированные в протоколе места для возможности функционального расширения системы (имя архива, время и др.).

При разработке программных модулей приема/передачи информационных пакетов следует учитывать рассмотренные форматы кадров запроса/ответа и разрабатывать остальное ПО, взаимодействующее с сервером в соответствии с рассмотренным форматом.

Большой объем измерительной информации, накапливаемый на втором уровне ИИС в течение импульса, определяет использование 1 Гбит/с магистрального канала Ethernet 1000BaseSX между коммутатором ИИС и коммутатором верхнего уровня САЭ КТМ. Для связи со смежными системами предусмотрено использование Ethernet 100BaseFX каналов связи. Выбор оптоволоконной среды передачи определяется требованиями к гальванической развязке и защите от электронных помех.

Одной из важных функций ИИС КТМ является функция удаленного доступа к БДРИ по сети Internet. Для организации доступа к БДРИ КТМ предусмотрено использование WEB-сервера токамака КТМ, не входящего в состав САЭ КТМ. Для связи WEB-сервера с БДРИ токамака КТМ, физически размещаемой на сервере сбора и архивирования данных третьего уровня ИИС, предусмотрено использование Ethernet 100BaseFX интерфейса. Помимо этого, в состав WEB-сервера обязательно должен входить аппаратно реализованный Firewall для выполнения надежной защиты от сетевого доступа из внешних сетей.

3.4.3. Интерфейсы и протокол передачи данных из системы управления плазмой и системы противоаварийной защиты на третий уровень ИИС

Интерфейсы передачи данных из СУП и СПЗ на третий уровень ИИС предназначены для передачи параметров работы СУП и информации о событийных сигналах на верхний уровень ИИС после окончания разряда и ее сохранения в БДРИ. Рассматриваемый интерфейс также используется для передачи информации в СУП и СПЗ для выполнения

конфигурирования и тестирования перечисленных систем при работе ИИС в предпусковом режиме.

Сохранение информации из СУП и СПЗ в БДРИ определяет необходимость использования единого интерфейса связи с сервером архивирования и сбора данных третьего уровня ИИС. В качестве таких интерфейсов на верхнем уровне ИИС используются интерфейсы Ethernet 100BaseTX, Ethernet 100BaseFX и Ethernet 1000BaseSX. Объем сохраняемой после каждого разряда информации из СУП и СПЗ не требует использования интерфейса Ethernet 1000BaseSX. Вместе с этим, требования к обеспечению полной гальванической развязки оборудования верхних уровней ИИС от оборудования, размещаемого в экспериментальном зале КТМ и прилегающих помещениях, определяют выбор оптоволоконных линий связи. В соответствии с этим, для подключения СУП и СПЗ зарезервированы 100BaseFX порты сетевого коммутатора верхнего уровня ИИС. В качестве протоколов передачи информации предусмотрено использование транспортного протокола TCP/IP.

РАЗДЕЛ 4. ЛОГИЧЕСКАЯ СТРУКТУРА БАЗЫ ДАННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ ИСПЫТАНИЙ ТОКАМАКА КТМ

4.1. Модель данных базы данных результатов испытаний

БДРИ токамака КТМ предназначена для сохранения полной информации о проводимых экспериментах, включая результаты анализа измерительной информации, а также для поиска и предоставления информации по запросам исследователей и программ послеэкспериментальной обработки информации.

Для каждого проводимого на установке КТМ разряда в БДРИ сохраняется следующая информация:

- 1) результаты прямых измерений плазмо-физических параметров и технологических параметров, значения которых используются при анализе экспериментальной информации;
- 2) результаты косвенных измерений (вычисляемые параметры);
- 3) метрологические характеристики измерительных каналов;
- 4) данные паспорта разряда, включая:
 - регламент работы технологических систем;
 - настроечные параметры измерительной аппаратуры;
 - настроечные параметры СС;
- 5) комментарии исследователей.

Помимо определения того, какая информация должна быть сохранена в БДРИ, необходимо установить взаимосвязи между элементами этой информации. Первым этапом данной работы является создание модели данных.

Анализ систем сбора данных термоядерных установок типа токамак [22, 34, 41, 49] показал, что при структурировании данных на них вначале исторически использовались иерархические модели данных, получившие название «дерево разряда». Позднее эти модели перестали удовлетворять возрастающим требованиям по выполнению сложных операций поиска и выборки данных, и для структурирования данных стали использоваться реляционные и объектно-реляционные модели. При этом иерархические модели были сохранены как привычный интерфейс группирования и предоставления доступа к данным, хотя они и не имеют ничего общего со структурой используемых баз данных.

Сказанное можно пояснить на примере составления модели «дерева разряда» для структурирования данных токамака КТМ (рис. 4.1.1).



Рис. 4.1.1. Структура дерева разряда КТМ

В представленной структуре символом «.» обозначается элемент данных, а символом «./» – информационный узел.

В структуре «дерева разряда» КТМ выделяются следующие типы элементов и узлов хранения информации:

- сигнал (элемент) – используется для хранения необработанных результатов измерений;
- настройка аппаратуры (элемент) – задает значение коэффициента усиления, смещение, коллимацию и т. д.;
- элемент «действие» – содержит информацию об имени и параметрах процедуры управления или обработки;
- комментарий (элемент) – содержит текстовую справочную информацию;
- узел – используется для группирования нижестоящих в иерархии элементов и узлов.

Основной функцией узлов является группирование элементов информации, обладающих общими свойствами, в одном месте. По аналогии со структурой дерева разряда MDSplus при составлении «дерева

разряда» КТМ использовались следующие четыре признака группирования:

- принадлежность к диагностической аппаратуре;
- принадлежность к исследуемым в плазме процессам;
- принадлежность к технологическим системам и процессам;
- принадлежность к результатам обработки данных.

В соответствии с данной классификацией, на верхнем уровне иерархии вся информация ИИС КТМ сгруппирована по принципу принадлежности к пяти типам исследуемых физических процессов: корпускулярные явления, спектроскопия, процессы переноса, процессы в пристеночной плазме, МГД-процессы.

Рассмотрим принципы структурирования информации для каждой из перечисленных групп на примере МГД-процессов. При описании МГД-процессов выделяются три способа группирования информации, которым соответствуют три типа информационных узлов:

- 1) узел результатов обработки;
- 2) узел параметров запуска программ обработки;
- 3) узел описания диагностической системы (узел ЭМД, узел диагностики мягкого рентгеновского излучения и т. д.).

В состав информационного узла «Электромагнитная диагностика», в свою очередь, включены следующие узлы и элементы:

- узлы типа «экспериментальные данные» – хранят элементы типа «сигнал» для измерительных каналов с двухкомпонентных магнитных зондов, петель U_p , петель V_t и т. д.;
- узлы типа «Параметры настройки ПСД» – хранят элементы типа «настройка аппаратуры» – градуировочные коэффициенты, информацию о геометрических параметрах, используемых каналах и т. д.;
- элементы типа «комментарий» – любая дополнительная текстовая информация;
- элементы типа «действие» – описывают изменение режима работы ПСД или диагностики в заданный момент времени или при наступлении заданного события (начать сбор данных в момент t_7 относительно начала разряда – элемент «Начало сбора данных»; изменить частоту оцифровки при появлении асинхронного сигнала синхронизации « $li/2_level1$ » – элемент «Изменение частоты оцифровки» – и т. д.).

Рассмотренная иерархическая модель «дерева разряда» КТМ проста и наглядна, но обладает множеством ограничений при ее реализации с использованием функций файловой системы (см. 3.2.5). Среди основ-

ных недостатков следует выделить сложность изменения структуры дерева разряда (в противном случае, станет невозможно автоматически сравнивать результаты разных разрядов) и сложность и высокую длительность выполнения операций поиска и сопоставления результатов исследований (необработанные данные, результаты восстановления, значение одного и того же измеряемого параметра в разных разрядах и т. д.).

Поэтому для структурирования информации в БДРИ КТМ предлагается использовать более гибкую модель данных, сохранив иерархическую модель как одну из форм организации графического интерфейса доступа к БДРИ.

При этом все рассмотренные выше элементы хранения информации также будут входить в состав модели данных, но способ их структурирования будет принципиально отличаться.

Большинство современных коммерческих и свободно распространяемых СУБД поддерживает реляционные, объектно-реляционные и объектные модели данных.

В БДРИ КТМ должно сохраняться большое количество разнотипной информации, поэтому при реализации перечисленных информационных узлов и элементов в рамках модели реляционной базы данных возникает необходимость создания множества разнотипных таблиц, конструирования собственных форматов хранения информации и структур поиска данных, что является существенным ограничением и приводит к возникновению технических трудностей, не позволяющих быстро реализовать перечисленные информационные структуры.

В качестве альтернативы реляционной модели данных были рассмотрены объектная и объектно-реляционная модели. Выбор объектной модели данных открывает фактически неограниченную свободу в конструировании типов данных, что, помимо положительных моментов, также приводит к необходимости тщательной проверки целостности, корректности и надежности функционирования системы. В настоящее время объектно-ориентированные СУБД еще находятся в стадии своего развития и по многим направлениям не выдерживают конкуренции с объектно-реляционными СУБД.

С учетом этого при решении рассматриваемой задачи предпочтительнее использовать объектно-реляционную модель данных, которая поддерживается такими системами управления базами данных, как Oracle, PostgreSQL, Microsoft SQL2000 Server и др. Анализ существующих решений показал, что предлагаемый подход используется в настоящее время на токамаках Alcator C-Mod, DIII-D (США) и T-10 (Россия).

4.2. Типы полей данных базы данных результатов испытаний

В соответствии с рассмотренной выше объектно-реляционной моделью данных БДРИ КТМ, каждый элемент «дерева разряда» КТМ сохраняется в проблемно-ориентированном формате и размещается в соответствующем поле реляционной таблицы (поле данных). Для упорядочивания структуры БДРИ КТМ предлагается во всех записях использовать одинаковое количество полей, хранить их в одной объектно-реляционной таблице и выделять под поле данных последнее поле записи.

Следует напомнить, что элементу «дерева разряда» КТМ типа «сигнал» соответствует временной ряд всех измеренных значений с соответствующего измерительного канала БИПР физической или технологической диагностики.

Прежде всего, определим принципы формирования проблемно-ориентированных форматов данных для сохранения результатов прямых измерений в поле данных БДРИ КТМ. В БИПР информация уже сгруппирована по принадлежности к измерительному каналу и времени проведения измерения. При этом используются форматы данных, представленные в табл. 3.2.4.1–3.2.4.4. После передачи данных на третий уровень ИИС перечисленные форматы хранения должны использоваться при формировании полей данных в БДРИ. В соответствии с этим, при формировании поля данных БДРИ будут использоваться сохраненные измеренные значения в типовых и проблемно-ориентированных форматах, таких как Int, Float, Byte, array, specter, image. Привязка измеренных значений к времени измерений выполняется путем создания дополнительных информационных структур средствами СУБД.

В соответствии с рассматриваемым подходом для сохранения информации с каждого измерительного канала в БДРИ может выделяться отдельная запись (рис. 4.2.1).

Заголовок (З)		Дополнительные поля (ДП)			Служебные поля (СП)			Паспорт данных	Поле данных
Поле 1	Поле 2	Поле 3	Поле 4	Поле 5	Поле 6	Поле 7	Поле 8	Поле 9	Поле 10
Номер разряда	Имя измерительного канала	Дата создания записи	Тип данных в записи	Текстовый комментарий	Версия формата данных	Метод упаковки паспорта данных	Метод упаковки данных	Паспорт данных (DPS.*.)	Паспорт данных (DAT.*.)

Рис. 4.2.1. Логическая структура записи

Измерительная информация сохраняется в поле данных этой записи. В поле данных также хранится служебная информация для быстрого поиска данных по временной метке. Полю данных с такой структурой соответствует тип поля «Сигнал (Signal)» (рис. 4.2.2, 4.2.3).

float	float	••••	float	Измеряемый параметр Метки времени
t1	t2	••••	tN	

Рис. 4.2.2. Поле данных типа Signal (DAT.ДТМ.*; DAT.ДКТ.*)

Image1	Image2	••••	ImageN	Цифровые изображения Метки времени
t1	t2	••••	tN	

Рис. 4.2.3. Поле данных типа Signal (DAT.Ik.cam; DAT.V.cam.*)

Для удобства анализа и совместной обработки данных также предусмотрена возможность сохранения измерительной информации с нескольких однотипных измерительных каналов в поле данных одной записи (рис. 4.2.4, 4.2.5). Рассматриваемое поле имеет тип «Таблица (Table)».

	Спектр1	Спектр2	••••	СпектрN	Метки времени
	t1	t2		tN	
lambda1	F1	F1	••••	F1	
lambda2	F1	F1	••••	F1	
•	•	•	••••	•	
•	•	•	••••	•	
•	•	•	••••	•	
lambdaM	Fm	Fm	••••	Fm	

Рис. 4.2.4. Поле данных типа Table (DAT.sp.*)

Перечисленные типы полей данных позволяют сохранять все результаты прямых измерений в БДРИ КТМ.

Для сохранения результатов обработки экспериментальных данных в БДРИ, к которым относятся вычисляемые параметры, временные ряды, данные для построения трехмерных пространственно-временных

распределений, предлагается использовать перечисленные типы полей данных и ввести несколько новых типов полей данных. Например, при выполнении визуализации реконструированных пространственно-временных распределений может потребоваться сохранить в поле данных одного типа цифровое изображение, многомерный вектор численных значений, отдельное значение параметра и символьную надпись.

	Массив 1	Массив 2	...	Массив N	
	t1	t2		tN	Метки времени
lambda1	F1	F1	...	F1	
lambda2	F1	F1	...	F1	
⋮	⋮	⋮		⋮	
lambdaM	Fm	Fm	...	Fm	

Рис. 4.2.5. Поле данных Table (DAT.emd.*; DAT.mhd.*; Dat.sxr.*)

Параметры работы ПСД, к которым относятся параметры и сигналы управления работой ПСД во время разряда, параметры, задающие режим передачи информации в БДРИ, параметры типовых алгоритмов обработки экспериментальных данных, не требуют использования сложных типов полей данных при их сохранении в БДРИ КТМ. Для их сохранения могут быть использованы поля данных типа float, string, а также сконструированные на их основе относительно простые поля данных.

Следует отметить, что при формировании новых типов полей данных любой сложности для сохранения данных из системы управления, САЗ, технологических систем, служебной информации или сценария разряда логическая структура БДРИ не потребует никаких изменений. Это обеспечит выполнение требований к расширяемости и гибкости БДРИ КТМ.

РАЗДЕЛ 5. АЛГОРИТМЫ РАБОТЫ ИИС

5.1. Блок-схема работы ИИС в пусковом режиме и ее описание

ИИС токамака КТМ работает во всех основных режимах функционирования установки: предпусковом, пусковом и послепусковом.

В предпусковом режиме выполняется включение оборудования, загрузка и инициализация ПО, тестирование системы. Этот режим является подготовительным для перехода в пусковой режим, в котором осуществляется проведение экспериментов.

Пусковой режим разделяется на предпусковой подрежим работы (длительность 5 с) и подрежим межразрядной паузы (длительность 10 мин), которые циклически повторяются. Фактически все измерения проводятся в подрежиме разряда. Подрежим межразрядной паузы используется для архивирования экспериментальных данных, анализа результатов и задания программы нового разряда.

Блок-схема алгоритма работы ИИС КТМ приведена на чертеже КТМ.03.001.014.ТП. К началу пускового режима ИИС КТМ должна находиться в состоянии пусковой готовности. До этого момента уже должно быть завершено тестирование ПСД. При получении положительных результатов тестирования формируется сигнал Test.Ok, при отрицательных – Test.Fail. Если тестирование прошло успешно, то сигнал Test.Ok используется при дальнейшей работе ПСД, а также передается на ПОУ экспериментом, а ПСД переводится в состояние «Пусковая готовность уровень 1». В этом состоянии ПСД ожидает прихода сообщения «Пусковой режим».

Переход ПСД к работе в пусковом режиме выполняется при получении сигнала «Пусковой режим» и наличии сигнала Test.Ok. Сообщение «Пусковой режим» может быть сформировано несколькими способами. Предлагается формировать сообщение «Пусковой режим» на ПОУ экспериментом. С ЭВМ ПОУ сообщение в широкополосном режиме будет передаваться на сервер сбора и архивирования данных третьего уровня ИИС, во все ПСД и в СС. Сообщение должно поступить в ПСД до начала разряда ($t = t_0$), т. е. до момента начала ввода тока в обмотки CS и TF. Момент «Начало разряда» задается СС, которая формирует сигнал «Разряд (Discharge)» и передает его в ПСД.

В соответствии с режимом сбора данных все ПСД можно разделить на пять групп. Первая группа ПСД – технологические диагностики, работающие непрерывно или с момента $t = t_0$ (технологические диагностики группы 1). Вторая группа ПСД начинает проводить измерения не-

задолго до момента появления плазмы – $I_p > 50$ кА (технологические диагностики группы 2). Третья группа ПСД непрерывно проводит измерения на «Плато тока плазмы» ($I_p = 750$ кА). К диагностикам этой группы относятся многие физические диагностики. Четвертая группа ПСД проводит измерения в нескольких временных «окнах» на «Плато тока плазмы» для обеспечения высокого временного разрешения при анализе быстрых процессов в плазме, а также для снижения объема регистрируемой информации при работе вне временного окна.

«Начало разряда» соответствует моменту начала ввода тока в обмотки ТФ. На этом этапе плазмы еще не существует, но некоторые ПСД уже должны выполнять сбор данных. Например, ПСД технологических диагностик должны проводить измерения с момента «Начало разряда», для того чтобы иметь информацию о токах и напряжениях в обмотках управления, о температуре и механических напряжениях элементов конструкции вакуумной камеры. Для этих ПСД конфигурационный параметр $t_{.daq}$ (время начала сбора данных) устанавливается равным времени начала разряда (t_0). Момент времени t_0 определяется приходом синхросигнала «Разряд» при наличии сигнала «Пусковой режим».

Большинство ПСД должны выполнять сбор данных после того, как появится плазма и будет достигнуто «плато тока». Поэтому перечисленные ПСД ожидают появления других сигналов синхронизации.

Выполнение сбора данных на этапе роста тока также требует формирования дополнительных сигналов синхронизации. Например, для привязки измерительной информации к моменту появления тока плазмы предлагается использовать событийный сигнал $I_p.Valid$, формируемый при выполнении условия $I_p > I_{p.min} = 50$ кА (начало фазы подъема тока). Это объясняется тем, что при использовании данных с ПСД в СУП важно иметь точную привязку измеренных значений к моменту появления плазмы, т. к. этот момент заранее нельзя предсказать и измерения начинают проводить заблаговременно до наступления указанного момента. До поступления сигнала $I_p.Valid$ измерительная информация с ПСД будет передаваться в СУП, но выполнение алгоритмов управления будет блокироваться. Обработка сигнала $I_p.Valid$ позволит снять блокировку. При этом событийный сигнал $I_p.Valid$ должен содержать информацию о моменте времени, в который он был зарегистрирован.

Используя метку времени, система управления определит, какие из измеренных значений использовать в алгоритмах управления. Код событийного сигнала $I_p.Valid$ предлагается передавать вместе с другими данными из ПСД ЭМД.

Завершение фазы «Подъем тока плазмы» происходит в момент времени, когда выполняется условие $I_p = I_{p.зад} = 750$ кА. Начиная с рассматриваемого момента, во всех ПСД должны проводиться измерения.

Для системы управления этот момент характеризуется переходом с алгоритмов логико-программного управления на алгоритмы многосвязанного управления формой и положением плазмы. Учитывая то, что рассматриваемый момент времени нельзя предсказать, на практике измерения начинают проводить немного раньше. Измеренные до интересующего момента времени значения при желании могут быть автоматически уничтожены. Момент времени $t(I_{p,зад})$ соответствует выходу на «Плато тока». Для простоты фаза переходного процесса «Подъем тока плазмы» – «Плато тока плазмы» отдельно не рассматривается.

При работе в фазе «Плато тока плазмы» все измеряемые экспериментальные данные сохраняются в буферной памяти БИПР. Часть сохраняемых данных уже во время разряда передается в СУП и СПЗ. Завершение измерений осуществляется по сигналу «Конец разряда».

После завершения разряда (подрежим межразрядной паузы) вся измерительная информация переносится из буферной памяти БИПР на третий уровень ИИС, сохраняется в БДРИ, обрабатывается и отображается на панели коллективного пользования, на пульте ведущего физика и на дополнительных рабочих станциях. В том случае, если эксперимент еще не закончен, ведущий физик и операторы анализируют результаты прошедшего разряда, изменяют программу эксперимента и готовятся к началу следующего разряда. Каждый эксперимент, в идеальном случае, может проходить в течение всего рабочего дня и состоять из ста и более разрядов. При завершении эксперимента запускается программа останова ИИС, в соответствии с которой отключается оборудование первого и второго уровней ИИС. Сервер сбора данных и архивирования результатов экспериментов вместе с сервером обработки и визуализации (третий уровень ИИС) могут работать непрерывно для выполнения программ обработки экспериментальной информации, а также для предоставления доступа к экспериментальным данным.

5.2. Блок-схема алгоритма работы блока измерения, первичной обработки и регистрации

Блок-схема алгоритма работы БИПР представлена на чертеже КТМ.03.001.012.ТП.

В предпусковом режиме выполняется включение БИПР, загрузка и инициализация ПО, тестирование работоспособности оборудования.

При получении положительных результатов тестирования формируется сигнал Test.Ok, который передается на ПОУ экспериментом. Сигнал анализируется и используется для формирования сообщения «Начать сбор данных». После этого сигнал «Начать сбор данных» одновременно передается в СС и во все БИПР.

Сообщение должно поступить в БИПР до начала разряда ($t = t_0$), т. е. до момента начала ввода тока в обмотки CS и TF. При этом следует отметить, что момент начала ввода тока определяется СС, и, пока СС не получит все необходимые сообщения, в т. ч. и сообщение «Начать сбор данных», синхросигнал, разрешающий ввод тока в обмотки CS и TF, не будет отправлен в СУП.

БИПР также начнет проводить измерения только после получения соответствующего сигнала от ЦБС. При этом сигнал «Начать сбор данных» определяет не момент начала измерений, а момент начала считывания данных из буферов модулей УСО данного БИПР. Это позволит исключить потерю измерительной информации в начале интервала измерения. «Пустые» данные будут автоматически удалены из результатов измерений, т. к. все результаты измерений привязаны к единому времени эксперимента.

Момент «Начало разряда» (время $t = 0$) задается СС, которая формирует сигнал «Разряд (Discharge)» и передает его в БИПР.

Модули УСО в БИПР начнут проводить измерения только после того, как истечет предусмотренная для данного БИПР в сценарии разряда задержка.

В течение разряда в БИПР осуществляется считывание данных из буферной памяти модулей УСО в оперативную память одноплатной ЭВМ. Параллельно этому выполняется формирование данных для передачи в СУП и СПЗ. Если передача требуется, то выполняется сжатие данных и формирование сетевых пакетов. На нижнем уровне также может выполняться предварительная обработка, например исключение промахов и цифровая фильтрация данных. После окончания разряда вся буферизируемая информация архивируется для уменьшения объема передаваемых сообщений и переносится в разделяемую память ЭВМ сбора и архивирования данных третьего уровня ИИС. После передачи всей информации БИПР ожидает сообщений с ПОУ экспериментом для перехода в состояние пусковой готовности БИПР или для завершения работы.

5.3. Блок-схема алгоритма сбора и регистрации диагностической и технологической информации в интервале между разрядами

Проведение измерений параметров и пространственно-временных распределений плазмы с высоким временным и пространственным разрешением приводит к возникновению больших по величине информационных потоков, которые целесообразно сохранять в течение разряда в буферной памяти ПСД. Это позволит снизить стоимость используемых проектных решений, т. к. технически проще построить систему сбора данных, выполняющую сохранение данных в буферной памяти,

чем систему, выполняющую передачу всей информации в реальном масштабе времени по сетевому каналу связи. Здесь следует отметить, что на токамаке КТМ в большинстве случаев измерительную информацию не требуется передавать в смежные подсистемы в реальном масштабе времени во время разряда. В соответствии с этим, основным объемом буферизируемой информации должен передаваться на третий уровень ИИС после окончания разряда для сохранения в БДРИ и представления результатов эксперимента.

Порядок и режимы передачи буферизируемой информации на третий уровень определяются алгоритмом работы ИИС в интервале между разрядами. Алгоритм работы ИИС предусматривает передачу буферизируемой информации о наиболее важных параметрах плазмы для представления исследователям на пульте ведущего физика и рабочих станциях уже через несколько секунд после окончания разряда. Это определяет приоритет выполнения выборки данных и очередность их передачи на третий уровень ИИС. Менее важная для оперативного управления токамаком информация становится доступной по запросам пользователей с задержкой в десятки секунд или через несколько минут, в зависимости от сложности алгоритмов обработки, объема отображаемой информации и используемого графического интерфейса. Вся отображаемая информация должна быть готова к просмотру в течение первой половины интервала межразрядной паузы. Оставшееся время будет использоваться операторами и ведущим физиком для детального анализа результатов прошедшего разряда, корректировки программы (сценария) следующего разряда и выполнения автоматического изменения настроек оборудования САЭ КТМ в соответствии со сценарием нового разряда.

Для обеспечения высокой скорости предоставления данных о параметрах разряда на пульте ведущего физика и панели коллективного пользования передача информации из буферной памяти БИПР должна выполняться в соответствии с алгоритмом сбора данных, приведенным на чертеже КТМ.03.001.017.ТП.

Запуск алгоритма начинается в предпусковом режиме работы САЭ КТМ, т. е. до начала проведения измерений. На этом этапе выполняется инициализация ПО сервера сбора данных и архивирования третьего уровня ИИС, после чего алгоритм переходит в состояние ожидания команды от ПОУ на считывание данных с БИПР. При получении команды от ПОУ алгоритм устанавливает сетевые соединения с БИПР и ожидает передачи данных от БИПР для записи в разделяемую память сервера сбора данных и архивирования.

Запись данных выполняется при помощи вызова удаленной процедуры `RPC_write()` следующим образом: сначала производится ввод и

разделение сетевых потоков от разных БИПР на сервере сбора данных и архивирования, после чего осуществляется выделение памяти под буферы экспериментальных данных и для нужд алгоритма архивирования LZO. Далее данные с БИПР распаковываются при помощи алгоритма LZO и записываются в буферы, после чего формируется код окончания записи данных в разделяемую память и данные становятся доступными для выполнения последующих операций.

Для сохранения экспериментальных данных из буферов разделяемой памяти в БДРИ может быть использовано несколько алгоритмов. В простейшем случае операция сохранения может начаться после того, как все данные будут занесены в разделяемую память. Однако объемы информации, регистрируемой ПСД, сильно варьируются (см. табл. 3.1.1), и для передачи данных в некоторых случаях потребуется существенно меньше времени. Анализ информации в табл. 3.1.1 показывает, что к этим подсистемам относятся большинство подсистем, измеряющих важнейшие параметры плазмы, которые важно отображать с минимальной задержкой после окончания разряда.

В этом случае предпочтительно выполнять параллельную регистрацию информации из БДРИ во всех буферах разделяемой памяти, отслеживая моменты заполнения соответствующих буферов. При определении момента заполнения буфера могут быть использованы многочисленные алгоритмы программной синхронизации, такие как семафоры, алгоритмы межпроцессорного взаимодействия (IPC), алгоритмы блокировки параллельных потоков выполнения программ.

В этом случае алгоритм работы программы занесения данных в БДРИ из буферов разделяемой памяти примет следующий вид. В процессе выполнения параллельной записи данных в разделяемую память наступает момент, когда все данные из системы записаны в буфер с номером К. Для определения факта заполнения буфера предлагается использовать сигнал окончания передачи (закрытие сетевого соединения), формируемый ПСД. Полученный сигнал используется для снятия блокировки записи в БДРИ. В случае использования потоковых алгоритмов данные из разных буферов могут считываться параллельно. Также можно установить дополнительные блокировки для введения приоритетов чтения информации из разных буферов.

Сценарий разряда токамака КТМ предусматривает автоматическое отображение основных параметров плазмы после окончания разряда на панелях коллективного пользования и пультах САЭ КТМ. В соответствии с этим, информация, поступающая в сервер архивирования и сбора данных, должна с минимальными задержками во времени передаваться в сервер обработки и визуализации данных и на пульты управления.

Для передачи экспериментальных данных в ЭВМ обработки и визуализации, а также на пультах и дополнительные рабочие станции операторов предлагается сначала сохранять все экспериментальные данные в БДРИ. К преимуществам данного метода можно отнести возможность использования стандартных программных интерфейсов доступа к базе данных, надежность хранения и разграничение прав доступа к данным. Возникающие дополнительные задержки записи при извлечении данных из БДРИ, по предварительным оценкам, не будут противоречить требованиям ТЗ к параметрам САЭ КТМ. При возникновении дополнительных требований к повышению скорости передачи данных в ЭВМ обработки и отображения после окончания разряда дополнительно к рассмотренному алгоритму может быть реализован алгоритм непосредственной выборки данных из буфера разделяемой памяти или алгоритм прямой передачи информации из ПСД в соответствующую ЭВМ четвертого уровня ИИС. При этом следует отметить, что для выполнения перечисленных алгоритмов потребуется обязательно использовать специальные форматы данных уже на уровне ПСД, а также разрабатывать нетиповые программные модули для формирования последовательностей измеряемых данных с заданным временным шагом. Использование типовых программных интерфейсов доступа к БДРИ позволит избежать дублирования алгоритмов и разработки дополнительного ПО.

5.4. Выбор алгоритмов сжатия данных в ИИС

Общий объем диагностической информации, получаемой подсистемами ИИС КТМ, при использовании всего диагностического комплекса составит ~ 130 Мб для технологических диагностик и ~ 1900 Мб для физических диагностик (см. табл. 3.1.1). Вся получаемая при помощи диагностических подсистем информация должна быть передана на верхний уровень системы для обработки и сохранения в виде базы данных результатов экспериментов. Это накладывает очень высокие требования к техническим средствам, реализующим каналы передачи информации, и к устройствам хранения информации. Отсюда вытекает потребность сжатия информационных массивов ИИС как при передаче, так и при хранении в виде баз данных, что снижает стоимость системы в целом и стоимость хранения информации в течение длительных периодов времени. Для решения этой задачи в настоящее время существуют два пути.

1. Построение эффективных кодов, минимизирующих среднее число двоичных символов, требующихся для выражения одного символа сообщения. Такая возможность обеспечивается алгоритмами сжатия без потерь информации.

2. Учет числовых характеристик сигналов, несущих информацию, для формирования минимально необходимого количества координат, обеспечивающих представление непрерывного сигнала с требуемой точностью. Другими словами, реализация сжатия с потерей информации.

Примером использования первой группы алгоритмов являются многочисленные программы архивирования данных (ARJ, PKZIP, GZ и др.).

В то же время следует отметить, что измерительная информация зачастую избыточна, в частности, за счет наличия корреляционных связей между отсчетами временных функций, которыми описываются измеряемые параметры. Поэтому при сжатии таких данных во многих случаях допустимы потери, не приводящие к ухудшению точности воспроизведения сигналов выше допустимых границ.

Решение задачи сжатия данных существенным образом зависит от цели выполняемых измерений и осуществляется путем преобразования исходной информации. Существуют два возможных класса преобразования данных, приводящих к сжатию исходной информации с допустимыми потерями.

1. Необратимые преобразования, в результате которых невозможно восстановить исследуемый (контролируемый) процесс как функцию времени, но которые обеспечивают получение необходимых данных в виде конечного полезного результата (например, интегральная или дифференциальная плотность распределения, спектральная плотность мощности, корреляционная функция и т. д.).

2. Квазиобратимые преобразования, позволяющие представить измеряемый (контролируемый) процесс меньшим числом координат, но достаточным для восстановления параметра как функции времени с заданной точностью.

Алгоритмы необратимых преобразований в ряде случаев могут дать очень высокие коэффициенты сжатия, но они носят частный характер и разрабатываются для каждого конкретного случая, поэтому в данном пособии не рассматриваются.

5.4.1. Алгоритмы сжатия без потери информации

Рассмотрим ряд распространенных алгоритмов сжатия информации, работающих без потери информации.

Алгоритм RLE. Данный алгоритм необычайно прост в реализации. Групповое кодирование (RLE) (от английского Run Length Encoding) – один из самых старых и самых простых алгоритмов сжатия. Информационное сообщение в нем представляется цепочкой байт, в которой встречаются последовательности одинаковых байт. Замена их на пары <счетчик повторений, значение> уменьшает избыточность данных. Ал-

горитм очень прост в реализации, имеет высокую скорость, но в ряде случаев при его использовании можно даже увеличить размер сообщения, если повторяющихся цепочек нет.

Семейство алгоритмов LZ. Сжатие информационных массивов осуществляется путем замены одним кодовым словом повторяющихся цепочек символов. Существует довольно большое семейство LZ-подобных алгоритмов, различающихся, в том числе, методом поиска повторяющихся цепочек, например **LZW**. Название алгоритм получил по первым буквам фамилий его разработчиков (Lempel, Ziv и Welch).

В рассматриваемом алгоритме необходимо использовать область памяти для хранения цепочек символов и их кодов. Процесс сжатия выглядит достаточно просто. Последовательно считываются символы входного потока, и выполняется проверка того, есть ли в созданной таблице цепочек полученная строка. Если строка есть, то считывается следующий символ, а если строки нет, то в выходной поток заносится код для предыдущей найденной строки, затем в таблицу цепочек добавляется строка, ей присваивается новый код, и продолжается поиск. При этом для экономии памяти достаточно хранить в таблице только пару <код предыдущей подстроки, добавленный символ>. В худшем случае, когда повторяющихся цепочек в передаваемом сообщении нет, его размер после сжатия не изменится. Особенность **LZW** заключается в том, что для декомпрессии не нужно сохранять таблицу цепочек в файл для распаковки. Алгоритм построен таким образом, что таблицу цепочек можно восстановить, пользуясь только потоком кодов.

LZW является универсальным алгоритмом, который хорошо работает на данных любого типа, именно его варианты используются в обычных архиваторах.

Другая разновидность алгоритма **LZ** носит название **LZO** (Lempel–Ziv–Oberhumer). Алгоритм оптимизирован для сжатия данных в реальном масштабе времени. Для конечных пользователей имеется свободно распространяемая библиотека функций, реализующих этот алгоритм. При достаточно высоком коэффициенте сжатия ($k = 10$) алгоритм **LZO** обеспечивает скорость компрессии 5 Мб/с, скорость декомпрессии 10 Мб/с.

Алгоритм Хаффмана. Один из классических алгоритмов, известный с 1960-х гг. Алгоритм использует частоту появления одинаковых байт в изображении. В соответствии с этим алгоритмом символы входного потока, которые встречаются в сообщении большее число раз, кодируются цепочкой бит меньшей длины, и, напротив, встречающимся редко ставится в соответствие цепочка бит большей длины. При этом требуется два прохода по сообщению – для сбора статистики и собст-

венно для выполнения компрессии. Алгоритм трудно использовать в реальном масштабе времени, т. к. для получения существенных коэффициентов сжатия необходимо применять алгоритм для массивов большого размера. Следовательно, алгоритм Хаффмана можно использовать в послеекспериментальном режиме для упаковки данных, хранящихся на магнитных носителях.

Несмотря на то, что все рассмотренные (и другие) алгоритмы сжатия без потерь достаточно универсальны и могут использоваться для различных видов сообщений, у них, по сегодняшним меркам, слишком маленький коэффициент сжатия (в среднем $k = 2-10$). В свою очередь алгоритмы сжатия с потерями оперируют с коэффициентами $k = 10-200$. Далее рассмотрим основные особенности этих алгоритмов.

5.4.2. Алгоритмы сжатия с потерей информации

В большинстве случаев информация, получаемая от диагностических подсистем ИИС, представляет собой вектор, состоящий из мгновенных отсчетов изменяющегося во времени сигнала f_1, f_2, \dots, f_n , где n – количество временных отсчетов. Задача заключается в такой минимизации координат сигнала, после которой возможно восстановление исследуемого (измеряемого) процесса с заданной точностью:

$$\frac{1}{T} \left[\int_T [f^*(t) - f(t)]^2 dt \right]^{\frac{1}{2}} \leq \xi(f^*, f).$$

Восстановление сообщения в линейном пространстве с помощью линейного оператора может быть записано в форме

$$f^*(t) = \sum_{k=1}^l C_k \varphi_k(t),$$

где $\varphi_k(t)$ – совокупность линейно независимых (базисных) функций, а C_k – новые координаты сигнала. Поскольку количество новых координат меньше, чем количество исходных, объем сжатых данных уменьшается на величину

$$k = \frac{n}{l}.$$

При этом в качестве базисных функций могут быть выбраны любые функции. Фактором, от которого зависит повышение коэффициента сжатия, является сходимость аппроксимирующего ряда для конкретного класса восстанавливаемой функции. Чем выше сходимость, тем меньше членов ряда, а следовательно, и меньшее число координат требуется для аппроксимации исходной функции при заданной точности. При этом

следует отметить, что сходимость существенно зависит от выбранной системы базисных функций. И в то же время не существует базиса, который обеспечивал бы наилучшую сходимость для всех классов аппроксимируемых функций.

Часто для целей сжатия выбирают базисные функции ряда Фурье, при этом сигнал представляется в виде набора гармонических колебаний с различными частотами и амплитудами. Используя дискретное Фурье-преобразование, можно упаковывать как временные векторы, так и двумерные изображения с высокой степенью компрессии. Недостаток методов, основанных на Фурье-преобразовании, заключается в том, что перед обработкой сообщения его необходимо разделить на блоки фиксированного размера. Очень часто это приводит к снижению качества: при обратном восстановлении сигнала видны границы блоков.

В конце 1980-х – начале 1990-х гг. был разработан новый стандарт, названный Wavelet-компрессией (в русскоязычной литературе используется термин «вейвлет»). В буквальном переводе с английского слово «wavelet» означает «маленькая волна». Это название объясняется формой графиков функций, используемых в вейвлет-анализе. Идеологически же понятия «вейвлет-анализ» и «Фурье-анализ» эквивалентны. И в том, и в другом случае реальный сигнал заменяется набором функций.

Однако вейвлет-алгоритмы работают с целым вектором, а не с его частью. Во-вторых, с их помощью легко анализировать прерывистые сигналы и сигналы с острыми всплесками, поскольку вейвлет-алгоритмы используют принципиально иной математический аппарат. В-третьих, даже при стократном вейвлет-сжатии изображения его качество почти не изменяется.

Основная идея вейвлет-преобразования состоит в представлении некоторой случайной функции (в нашем случае – исследуемого сигнала) как суперпозиции определенных базисных негармонических функций – вейвлетов. Для того чтобы вейвлеты хорошо аппроксимировали исходный сигнал, они подвергаются масштабированию (сжатию или растяжению) и сдвигу (смещению).

Результат вейвлет-преобразования – обычный массив числовых коэффициентов. Такая форма представления информации об изображении очень удобна, поскольку числовые данные легко обрабатывать. Уникальные свойства вейвлетов позволяют построить базис, в котором данные будут представлены всего несколькими ненулевыми коэффициентами. Это означает, что массив коэффициентов можно сильно сжать обычными обратимыми методами без потери информации.

В итоге, компрессия происходит в два этапа: на первом осуществляется сжатие с потерей информации (вейвлет-преобразование), на втором – обычная архивация данных.

Для восстановления изображения необходимо повторить все действия в обратном порядке. Сначала восстанавливаются значения коэффициентов, а затем по ним, применяя обратное вейвлет-преобразование, получают изображение (сигнал).

В заключение следует отметить, что в зависимости от вычислительной мощности процессора, управляющего диагностической подсистемой ИИС, можно рекомендовать для использования в задачах сжатия измерительной информации или алгоритм LZ0 (сжатие без потерь при передаче), или комбинированные алгоритмы, дополнительно использующие методы сжатия с потерей информации. Вид базисных функций, при которых достигается максимальная степень сжатия, определяется на основе реальных данных, получаемых в процессе экспериментов.

5.5. Функции и алгоритмы работы системы управления базой данных результатов испытаний

Система управления БДРИ выполняет функции записи, хранения, поиска и извлечения экспериментальных данных, результатов обработки, параметров настройки и другой служебной информации из базы данных токамака КТМ, а также управления операциями архивирования данных на носители долговременного хранения информации.

Для обеспечения постоянного доступа к экспериментальным данным предусматривается непрерывная работа системы управления БДРИ независимо от текущего состояния функционирования установки КТМ. Вместе с этим следует отметить, что во время проведения экспериментов, особенно при занесении экспериментальных данных в БДРИ, потребляются фактически все вычислительные ресурсы сервера сбора и регистрации данных, поэтому запросы на получение данных, поступающие от рабочих станций исследователей, будут иметь низкий приоритет и могут выполняться с некоторой задержкой. На начальных стадиях работы токамака КТМ, когда потоки данных от диагностического комплекса будут небольшими, возникающие из-за сохранения результатов прошедшего разряда задержки должны находиться в допустимых пределах. В дальнейшем, по мере развития диагностического комплекса, проблема увеличения загрузки сервера БДРИ в процессе экспериментов может быть решена двумя способами:

- 1) путем создания промежуточного файла экспериментальных данных, называемого файлом разряда, имеющего более простую, чем в БДРИ, структуру, и введением временного регламента на выполнение операций переноса данных из файла разряда в БДРИ;

- 2) путем реализации дополнительных технических решений по распараллеливанию потоков данных, поступающих к серверу БДРИ от подсистем нижних уровней САЭ, и потоков запросов и данных, проходящих к серверу БДРИ от рабочих станций исследователей / от сервера БДРИ к рабочим станциям.

При работе в пусковом режиме основными функциями системы управления БДРИ является быстрое сохранение всех результатов эксперимента, собранных по завершении очередного плазменного разряда, и обработка запросов со стороны пульта ведущего физика, сервера обработки и визуализации данных, ПОУ экспериментом и пульта оператора-технолога. Для увеличения производительности сервера БДРИ параметры большинства запросов на оперативное извлечение данных из БДРИ задаются перед разрядом при формировании конфигурационных данных (см. 3.2.3). После сохранения результатов разряда в БДРИ эти запросы автоматически обрабатываются, в результате чего вся необходимая информация передается для обработки и отображения в пультовую стендового комплекса. Для оперативного просмотра дополнительной информации и анализа результатов разряда предусмотрено формирование дополнительных запросов к БДРИ с пульта ведущего физика, ПОУ экспериментом, пульта оператора-технолога, а также с рабочих станций.

После завершения анализа результатов прошедшего разряда ведущий физик принимает решение о проведении нового разряда или завершении эксперимента. Для проведения нового разряда требуется задать или изменить сценарий разряда (программу эксперимента). Ведущий физик запрашивает в БДРИ сценарий разряда и конфигурационные данные ИИС, проверяет правильность их задания и при необходимости на основе программы эксперимента вносит коррективы в паспорт очередного разряда. После этого информация о внесенных изменениях автоматически сохраняется в БДРИ, интерпретируется программой управления экспериментом, которая передает настроечные параметры в соответствующие подсистемы САЭ и проверяет готовность подсистем к очередному разряду.

Поскольку расчетный поток информации, которая должна сохраняться в БДРИ в результате проведения серии разрядов, составляет более 1 Гб/ч, в ИИС должна быть реализована функция архивирования данных. В качестве технической основы для подсистемы архивирования предлагается использовать накопитель на магнитооптических дисках большой емкости с автоматическим выбором и сменой носителя.

Для построения алгоритма архивирования должен быть задан критерий, на основе которого данные из БДРИ будут переноситься в архив. За критерий принятия решения об удалении данных из БДРИ и сохранении их в архиве, называемый критерием актуальности данных, принимается время существования данных в БДРИ и количество обращений к ним на интервале хранения. Перенос информации выполняется в автоматическом режиме либо в режиме диалога с оператором.

Расчет критерия актуальности осуществляется по данным файла статистики обращений (см. 3.2.5). Таким образом, редко используемые данные будут удалены из БДРИ и сохранены в архиве.

Для упрощения и унификации ПО ИИС архив имеет структуру, идентичную структуре БДРИ, за исключением того, что хранение осуществляется не на магнитном, а на магнитооптическом диске. Перед сохранением в архиве выполняется сжатие экспериментальных данных и их удаление из структуры БДРИ. При поступлении запроса на получение данных, сохраненных в архиве, выполняется их поиск, считывание из архива, разархивирование и запись в БДРИ в соответствии с принятой структурой. После этого обработка запроса завершается так же, как и для неархивированных данных.

5.6. Алгоритмы оперативной и послеэкспериментальной обработки информации

Ввиду характера исследований на сложных физических установках, каждая из которых является уникальной, информация о физических и технических параметрах, получаемая в процессе работы, имеет значительную ценность. В связи с этим для осуществления результативного функционирования установки, с точки зрения ее назначения, необходимо обеспечить максимальную эффективность при получении и обработке информации.

Для обеспечения такой эффективности ко всему комплексу аппаратных и программных средств должны предъявляться жесткие требования. Сказанное выше в полной мере относится и к алгоритмам оперативной и послеэкспериментальной обработки информации.

5.6.1. Перечень вычисляемых параметров плазменного разряда

За редким исключением, все измерения с технологических и физических диагностик подлежат обработке, оперативной (выполняемой в процессе измерений) и послеэкспериментальной (выполняемой в межразрядных паузах) (табл. 5.6.1.1).

Таблица 5.6.1.1

Вычисляемые физические параметры разряда

Вычисляемый параметр	Обозначение
Ток плазмы	I_p
Энергосодержание плазмы	W
Напряжение на обходе	U_p
Тороидальное поле	B_t
Положение плазмы по вертикали	Z
Эффективный заряд	Z_{eff}
Форма плазмы	$\Gamma(r, z)$
Профиль плотности электронов	$n_e(r)$
Профиль температуры электронов	$T_e(r, z)$
Профиль полной излучаемой мощности	$P(r, z)$
Профиль температуры ионов	$T_i(r)$
Поступление и баланс примесей	$Ti.balance(r)$
Обработка спектров в ВУФ-диапазоне излучения	$Sp.vuv$
Обработка спектров рентгеновского излучения	$Sp.sxr$
Реконструкция пространственной структуры МГД-колебаний, МГД-моды	$MHD(m, n)$
Профиль тока	$J(r, z)$
Профиль запаса устойчивости	$Q(r)$

5.6.2. Состав и характеристики типовых алгоритмов обработки данных

В наиболее общем случае обработка измерительной информации будет содержать следующее:

- интегрирование;
- фильтрацию;
- нормализацию;
- аппроксимацию (интерполяцию);
- представление;
- спектральный анализ с использованием быстрого Фурье-преобразования.

Перечисленные выше операции можно отнести к так называемым типовым алгоритмам обработки. Кроме того, к типовым алгоритмам можно отнести расчет некоторых косвенных параметров плазмы, сводящийся к элементарным алгебраическим манипуляциям над небольшим набором непосредственно измеряемых параметров, т. е. отмеченные операции могут быть реализованы на основе стандартных программных модулей и библиотек и не требуют специального программирования.

Ниже приведены выражения для расчета некоторых косвенных параметров плазменного шнура.

Вертикальное положение Z :

$$\Delta = \sum_i A_i (B p_i^n / I_p) + \sum_i B_i (B p_i^r / I_p) + C_0,$$

где I_p – тороидальный ток плазмы; A , B , C – коэффициенты, определяемые из статистического анализа различных вариантов электромагнитной конфигурации.

Полоидальное β :

$$\beta = 1 + K_\beta \frac{a^2}{b^2} \frac{B_T}{I_p^2} \delta\Phi,$$

где K_β – масштабный коэффициент, учитывающий конструктивные особенности датчика; a – малый радиус плазменного шнура; b – радиус измерительного контура (расположения датчика); B_T – индукция тороидального магнитного поля; $\delta\Phi$ – диамагнитный поток.

Энергосодержание плазмы W :

$$W = K_W R I_p^2 \beta,$$

где K_W – масштабный коэффициент; R – большой радиус плазменного шнура.

Эффективный заряд Z_{eff} :

$$Z_{eff} = \frac{\sum_i n_i z_i^2}{n_e},$$

где n_i – концентрация ионов i -го сорта; z_i – заряд ионов i -го сорта; n_e – концентрация электронов.

5.6.3. Состав и характеристики специальных алгоритмов обработки

Существует ряд параметров плазмы, для расчета которых необходима разработка специального ПО. Зачастую расчет таких параметров весьма сложен и предъявляет высокие требования к вычислительной мощности аппаратной части системы. Кроме того, ряд параметров используется в контурах оперативного управления плазмой, что, в свою очередь, требует их расчета в адекватных циклу управления временных рамках.

Рассмотрим особенности специальных алгоритмов обработки. К параметрам, расчет которых осуществляется с помощью таких алгоритмов, относятся определение (реконструкция) различных физических полей, анализ излучений в широком спектральном диапазоне, обработка информации (сигналов) с ИК-камер и видеокамер.

Перечень вычисленных посредством специальных алгоритмов физических распределений приведен в табл. 5.6.3.1.

Таблица 5.6.3.1

Перечень вычисляемых физических распределений

Вычисляемый параметр	Обозначение
Форма плазмы	$\Gamma(r, z)$
Профиль плотности электронов	$n_e(r)$
Профиль температуры электронов	$T_e(r, z)$
Профиль полной излучаемой мощности	$P(r, z)$
Профиль температуры ионов	$T_i(r)$
Поступление и баланс примесей	Ti.balance (r)
Обработка спектров в ВУФ-диапазоне излучения	Sp.vuv
Обработка спектров рентгеновского излучения	Sp.sxr
Реконструкция пространственной структуры МГД-колебаний, МГД-моды	MHD (m, n)
Профиль тока	$J(r, z)$
Профиль запаса устойчивости	$Q(r)$

Следует отметить, что алгоритмы реконструкции (восстановления) профилей параметров имеют ряд общих особенностей: большинство измерений носит, во-первых, дистанционный, во-вторых, интегральный характер, т. е. первичные преобразователи диагностических систем осуществляют хордовые измерения, заключающиеся в восприятии интегральных значений по набору линий наблюдения (телесных углов), распределенных по сечению вакуумной камеры. Реконструкция, в данном случае, заключается в определении пространственно-временных распределений параметров, или, иначе, в определении локальных характеристик на основе интегральных (хордовых) измерений. Вычисление данных параметров нетривиально и требует разработки специальных алгоритмов. Следует отметить, что перечисленные вычисления относят к классу некорректных задач математической физики. Из этого следует, что небольшие погрешности в исходных данных (измерениях) могут привести к значительному искажению решения, причем результат вычисления в таких случаях зачастую не имеет физического смысла.

Общий подход к решению такого рода задач сводится к ограничению возможных классов решения на основе некоторых интуитивных либо априорных данных в виде пространственного распределения параметров. Кроме того, для решения таких задач целесообразно комбинировать данные с различных диагностических систем, благодаря чему устойчивость алгоритмов может быть увеличена.

Отдельно следует выделить алгоритмы, предназначенные для реконструкции формы плазменного шнура. Данная задача характеризуется всеми перечисленными выше качествами, но, кроме того, должна выполняться в реальном масштабе времени для использования в контуре управления (формой плазмы) СУП. Существует большое количество методик расчета формы плазмы, однако их рассмотрение выходит за рамки данного пособия.

В настоящее время на многих термоядерных установках используются так называемые коды, выполняющие большинство из указанных выше задач. Чаще всего это интегрированные программные комплексы, позволяющие рассчитывать всю совокупность вычисляемых параметров, а также выполнять задачи представления данных. Среди таких кодов EFIT, PET, DINA. Кроме того, существуют специализированные коды для выполнения в реальном масштабе времени, например rtEFIT.

Каждый из перечисленных кодов уникален и требует тщательной доводки и настройки для каждой исследовательской установки.

РАЗДЕЛ 6. ТЕХНИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ИИС ТОКАМАКА КТМ

В состав технических средств ИИС КТМ входит оборудование ПСД (третий уровень ИИС), сетевой коммутатор ИИС и стойка серверов САЭ КТМ (третий уровень ИИС), панель коллективного пользования и пульт ведущего физика (четвертый уровень ИИС) (чертеж КТМ.03.001.004.ТП).

Структурные решения по построению ПСД второго уровня ИИС предусматривают использование в качестве основного узла ПСД БИПР, вариант технической реализации которого должен учитывать характеристики конкретной диагностической аппаратуры.

6.1. Варианты технической реализации блоков измерения, первичной обработки и регистрации

БИПР является основой ПСД ИИС КТМ. Вариант технической реализации БИПР определяется составом и характеристиками интерфейсов связи с диагностической аппаратурой, требованиями к размещению БИПР, требованиями к выполнению функций предварительной обработки и регистрации информации, а также реализацией интерфейса связи с верхним уровнем ИИС.

По способу технической реализации выделяются два типа БИПР – БИПР на основе ММС и БИПР, имеющие встроенное исполнение.

ММС используются в тех случаях, когда ПСД имеет большое количество измерительных каналов, требуется измерять быстропротекающие процессы, необходимо использовать специализированные модули сбора данных, которые уже серийно выпускаются в стандарте соответствующей ММС. Важно отметить, что ММС, в принципе, могут быть использованы при построении всех ПСД. Вместе с этим, для удешевления проектных решений и повышения скорости обработки, а также для управления работой сложной диагностической аппаратуры в некоторых случаях возможно использование специализированных ВССД, выполняемых в виде БИПР.

Информация об используемых в ПСД типах БИПР, количестве модулей УСО и измерительных каналов приведена в табл. 6.1.1.

Таблица 6.1.1

Типы БИПР ПСД

Тип БИПР	Название ПСД	Кол-во измерительных каналов	Модули УСО	
			Тип	Кол-во
ММС	ПСД ЭМД	196	АЦП	12
ММС или ВССД	ПСД ОИ	3	ВАП, АЦП	1
ММС или ВССД	ПСД МИРР	12	ВАП, АЦП	1
ММС	ПСД Ha-Da	10	АЦП	1
ММС	Рекомб. спектрометрия	10	АЦП	1
ММС	ПСД ДПРП	64	АЦП	4
ММС	ПСД МГД	32 (128)	АЦП	2 (8)
ММС	ПСД ДЖРИ	2	АЦП;	1
		1	счетчик	1
ММС	ПСД РТС	196	АЦП	12
ММС	ПСД Te.obz спектрометр МРИ	3	АЦП	1
		10	АЦП	1
ММС	ПСД V.cam. (2-5)	4	модуль ввода видеоизображения	4
ММС	V.cam.1, ИК.cam	2	модуль ввода видеоизображения	2
ММС	СП.ОБЗ ВУФ	1	модуль ввода изображения	1
ММС	СП.ВР ВУФ	1	модуль ввода изображения	1
ММС	ПСД корпускулярный анализатор	28	счетчик	7
ММС	ПСД ИМ	16	АЦП	2
ММС	ПСД ИХТ	32	АЦП	2

Из приведенных в табл. 6.1.1 подсистем использование встроенных систем сбора данных актуально для диагностик «ОИ-рефрактометр» и «многочастотный импульсный РР». Это определяется малым количеством измерительных каналов, требованиями к использованию информации в СУП, а также компактными размерами перечисленных диагностик.

6.2. Размещение оборудования ИИС

Размещение ПСД по стойкам в экспериментальном зале токамака КТМ и прилегающих помещениях выполнено в соответствии с данными табл. 6.2.1 и показано на чертеже КТМ.03.001.019.ТП.

Таблица 6.2.1

Размещение технических средств ПСД

Название ПСД	Номер диагностики	Номер БИПР	Тип БИПР	Номер стойки
ПСД ЭМД	D_T1: D0a D0b	БИПР № 1 БИПР № 2	ММС ММС	стойка № 6 стойка № 2
ПСД ДКТ	D_T3	БИПР № 17–19	ММС	стойка № ?
ПСД ДТМ	D_T2	БИПР № 20–28	ВССД	стойка не требуется
ПСД АОГ	D_T4	БИПР № 29	ВССД	по месту размещения АОГ
ПСД ДВЧ.ген	D_T5	БИПР № 30	ВССД или ММС	по месту размещения ВЧ-генератора
ПСД ОИ	D1	БИПР № 3	ВССД или ММС	стойка № 1
ПСД МИРР	D2 D10	БИПР № 4	ВССД или ММС	стойка № 6
ПСД На-Да и рекомбинационного спектрометра ВУФ	D3 D13b	БИПР № 5	ММС	стойка № 2
ПСД ДПРП: Volo.obz, Volo.mch	D4 D11	БИПР № 6	ММС	стойка № 3
ПСД МГД	D5	БИПР № 7	ММС	стойка № 2
ПСД ДЖРИ	D6	БИПР № 8	ММС	стойка № 3
ПСД ДМРИ: РТС; Te.obz; спектрометр	D7 D12 D17	БИПР № 9 БИПР № 10	ММС ММС	стойка № 4
ПСД V.cam ПСД V + ИК.cam	D8 D16	БИПР № 11 БИПР № 12	ММС ММС	стойка № 2 стойка № 5
ПСД СП. ОБЗ ВУФ СП.ВР ВУФ	D13a D14	БИПР № 13	ММС	стойка № 7
Корпускулярный анализатор	D15	БИПР № 14	ММС	стойка № 5
ИМ	D9	БИПР № 15	ММС	стойка № 1
6 ст. = 18	120	S1 = 143	S2 = 150	

При размещении БИПР учитывались следующие факторы: сокращение длины сигнальных линий и кабельных каналов между диагностикой БИПР, размещение и подключение диагностик к патрубкам токамака КТМ, требования к обеспечению свободного доступа к вакуумной камере.

С учетом перечисленных факторов, в экспериментальном зале выделено шесть стоек для размещения БИПР. В каждой стойке устанавливаются ПСД двух или трех диагностик. Разделение ПСД некоторых диагностик на два блока БИПР определяется размещением диагностического оборудования, порядком его подключения к патрубкам вакуумной камеры токамака КТМ и, в ряде случаев, выбором технических решений по реализации рассматриваемых БИПР.

Связь ПСД с третьим уровнем ИИС и вторым уровнем СУП выполняется по сети Ethernet 100BaseFX. Использование сетевых коммутаторов обеспечивает топологию соединения типа «точка-точка» с гарантированной пропускной способностью.

6.3. Структура комплекса технических средств третьего и четвертого уровней ИИС КТМ

Структура комплекса технических средств ИИС представлена на рис. КТМ.03.001.007.ТП.

В состав комплекса технических средств третьего уровня ИИС входят сетевой коммутатор ИИС и стойка серверов САЭ КТМ.

Сетевой коммутатор ИИС размещается в стойке СПЗ и СС и обеспечивает связь с БИПР и стойкой серверов САЭ КТМ, а также с СПЗ. Обеспечение полной гальванической развязки между БИПР и сетевым коммутатором ИИС достигается благодаря использованию ВОЛС, на базе которых реализуется интерфейс 100BaseFX.

При выборе коммутатора учитывалась необходимость подключения 20-ти дуплексных оптоволоконных линий связи типа 100BaseFX и требование к увеличению количества портов в коммутаторе для подключения БИПР новых диагностик. В соответствии с требованиями был выбран модульный многопортовый коммутатор 3Com Ethernet Switch 4005. В состав коммутатора входят шасси, блок питания, вентиляторы, коммуникационная матрица, модуль управления и два типа коммуникационных модулей. К модулям первого типа относятся 8-мипортовые 100BaseFX сетевые коммутаторы с разъемами типа MT-RJ. Количество модулей 4 шт. Модуль второго типа – двухпортовый 1000Base1000SX адаптер для организации 1 Гбит/с линии связи с сетевым коммутатором верхнего уровня САЭ.

Стойка серверов САЭ КТМ (чертеж КТМ.03.001.010.ТП) также входит в состав оборудования третьего уровня ИИС, хотя и находится в разных помещениях с коммутатором ИИС. В ее составе используются двухпроцессорный сервер сбора и архивации данных, RAID-массив, сервер обработки и визуализации данных, а также сетевой коммутатор верхнего уровня САЭ КТМ.

Серверы базируются на системных платах Intel SE 7500WV2ATA с чипсетом E7500 и поставляются в корпусах Intel SR 1300 высотой 1U, предназначенных для монтирования в стойку. Каждый сервер имеет два 2,4 ГГц процессора Itanium, 2 ГБ ОЗУ и оснащен двумя интегрированными контроллерами Gigabit Ethernet. Сервер сбора и архивирования данных подключен к RAID-массиву RMS01(R-STYLE) по интерфейсу DualUltra 160 SCSI через аппаратно реализованный RAID-контроллер. RAID-массив также выполнен в стоечном исполнении и имеет высоту 4U.

Оборудование четвертого уровня ИИС размещается в пультовой САЭ и включает в свой состав плазменную панель № 1 и пульт ведущего физика. Плазменная панель PDS6101W-S(Fujitsu) монтируется на стену пультовой САЭ и имеет размер 1351×768 мм², количество символов 1351×768 и частоту обновления кадров 50/60 Hz. Панель поддерживает интерфейсы NTSC, PAL, SECAM, DVI и имеет входы mD-Sub15, BNC, DVI-D Terminal (Revision 1).

Пульт ведущего физика построен на базе персонального компьютера с процессором Pentium 4, 19-тидюймовым жидкокристаллическим монитором, функциональной и обычной клавиатурами.

Общий вид пультовой САЭ КТМ показан на чертеже КТМ.03.001.008.ТП.

РАЗДЕЛ 7. ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ИИС КТМ

ПО ИИС КТМ включает в свой состав на 2-м уровне – ПО ПСД, на 3-м уровне ПО сервера сбора и архивирования экспериментальных данных и ПО сервера обработки и визуализации экспериментальных данных, на 4-м уровне – ПО пульта ведущего физика и ПО операторских станций.

7.1. Программное обеспечение второго уровня ИИС КТМ

Состав ПО второго уровня ИИС КТМ определяется алгоритмами функционирования и типом ПСД второго уровня ИИС.

Функции, выполняемые ПСД, во многом определяются принципом организации процесса измерения и требованиями, накладываемыми системами – потребителями измерительной информации (система управления, САЗ, третий уровень ИИС). Принцип работы активных диагностик (типа С) предусматривает воздействие на плазму с целью проведения измерений, поэтому в составе ПО диагностики для решения задач управления техническими средствами самой диагностической системы могут использоваться дополнительные программные модули. Состав ПО ПСД пассивных диагностик также различается для диагностик типа А и диагностик типа В.

Более важным с точки зрения управления плазмой является разделение ПСД на предоставляющие и не предоставляющие измерительную информацию в контуры управления плазмой и СПЗ в реальном масштабе времени. В реальном масштабе времени в СУП передается информация с ПСД ЭМД, ПСД ОИ и ПСД РР. В СПЗ планируется использовать информацию с ПСД ЭМД, ПСД ДТМ и ПСД ДЖРИ.

Структура ПО ПСД ЭМД токамака КТМ приведена на рис. 7.1.1.

В составе ПО ПСД ЭМД присутствуют все основные типы программных модулей, характерные для ПО систем сбора данных второго уровня ИИС КТМ, поэтому рассмотрим ПО ЭМД более подробно. Помимо выполнения сбора, буферизации и предварительной обработки данных, ПСД ЭМД также использует программу Net.Client.sup для передачи данных в СУП в реальном масштабе времени, программу Net.Client.saz для передачи аварийных сигналов в СПЗ и программу Net.Client.iis для передачи буферизируемой измерительной информации на третий уровень ИИС после окончания разряда. Структура ПО ПСД ОИ и РР аналогична структуре ПО ПСД ЭМД. Состав программных модулей ПСД, предоставляющих информацию в СУП токамака КТМ, приведен в табл. 7.1.1.

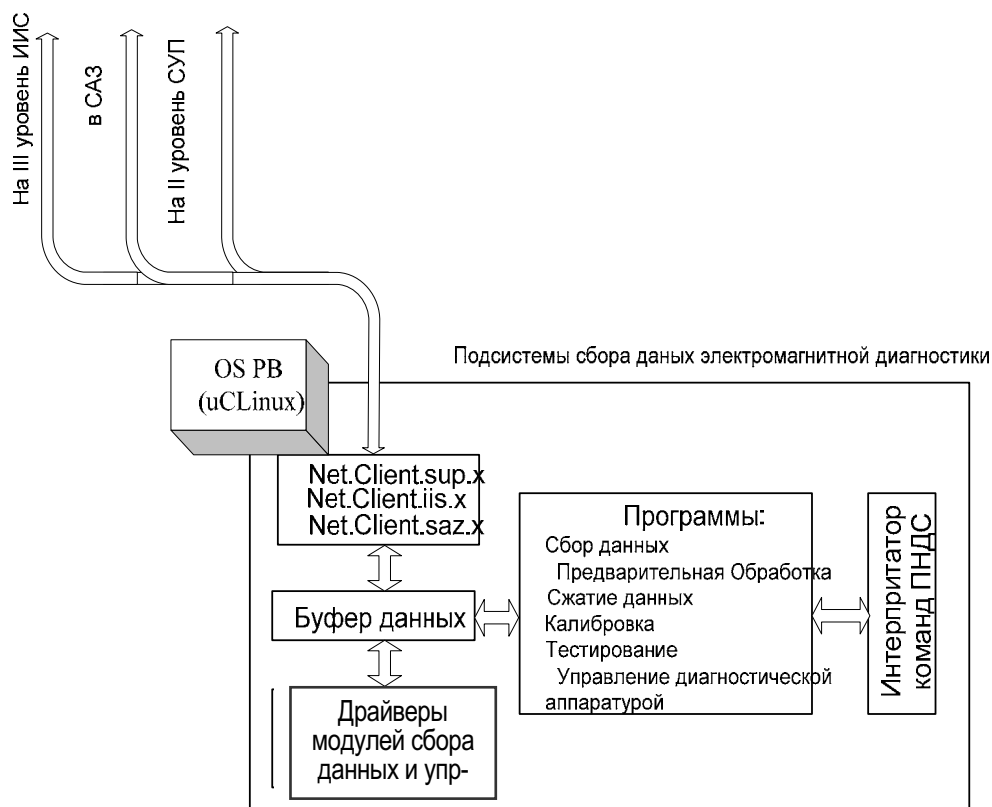


Рис. 7.1.1. Структура ПО второго уровня ИИС

Таблица 7.1.1

Состав программных модулей ПСД, предоставляющих информацию на второй уровень СУП

ЭМД	<p>Операционная система (OS Real Time Linux*)</p> <p>Драйвера модулей сбора данных (ADC.emd.Drv.1.x – сбор данных для передачи на третий уровень ИИС, ADC.emd.Drv.2.x – сбор данных для использования в СУП)</p> <p>Модуль обслуживания и диспетчеризации запросов от подсистем верхнего уровня к буферу экспериментальных данных (Data.buff.emd)</p> <p>Интерфейс сетевого взаимодействия программных процессов (RAW_Socket)</p> <p>Модуль формирования данных для передачи на второй уровень СУП (NetClient.emd.sup2)</p> <p>Модуль формирования данных для передачи на третий уровень ИИС (NetClient.emd.iis3)</p> <p>Программы предварительной обработки данных:</p> <ul style="list-style-type: none"> · цифровая фильтрация (emd.filtr.1 – сглаживание данных, emd.filtr.2 – цифровое интегрирование) · управление форматом данных, хранящихся в буферной памяти (datatype.1) · сжатие данных (Lzo.lib)
-----	--

ОИ	<p>Операционная система (OS Real Time Linux) Драйвера модулей сбора данных (TDC.oi.Drv.1.x) Модуль обслуживания и диспетчеризации запросов от подсистем верхнего уровня к буферу экспериментальных данных (Data.buff.oi) Интерфейс сетевого взаимодействия программных процессов (RAW_Socket) Модуль формирования данных для передачи на второй уровень СУП (NetClient.oi.sup2) Модуль формирования данных для передачи на третий уровень ИИС (NetClient.oi.iis3) Программы предварительной обработки данных:</p> <ul style="list-style-type: none"> · цифровая фильтрация (oi.filtr.1) · управление форматом данных, хранящихся в буферной памяти (datatype.1) · сжатие данных (Lzo.lib)
РР	<p>Операционная система (OS Real Time Linux) Драйвера модулей сбора данных (TDC.rr.Drv.1.x) Модуль обслуживания и диспетчеризации запросов от подсистем верхнего уровня к буферу экспериментальных данных (Data.buff.rr) Интерфейс сетевого взаимодействия программных процессов (RAW_Socket) Модуль формирования данных для передачи на второй уровень СУП (NetClient.rr.sup2) Модуль формирования данных для передачи на третий уровень ИИС (NetClient.rr.iis3) Программы предварительной обработки данных:</p> <ul style="list-style-type: none"> · цифровая фильтрация (rr.filtr.1) · управление форматом данных, хранящихся в буферной памяти (datatype.1) · сжатие данных (Lzo.lib)
<p>* Real Time Linux – одна из возможных ОС реального времени из семейства ОС, построенных на базе ядра Linux.</p>	

Как показано в табл. 7.1.1, во всех подсистемах, представленных в таблице, и в большинстве других ПСД используются программные модули, выполняющие однотипные функции. К этим модулям относятся модуль буфера экспериментальных данных, программы выборки данных из буфера экспериментальных данных, программы форматирования и сжатия данных, программы предварительной обработки, программы передачи данных на второй уровень СУП и на третий уровень ИИС. Большинство из перечисленных функций также должны быть реализованы и для подсистем, выполняющих только измерение и регистрацию

экспериментальных данных для третьего уровня ИИС, поэтому желательно обеспечить переносимость перечисленных программных модулей для всех ПСД токамака КТМ.

Переносимость программных модулей может быть достигнута наиболее легко в случае использования во всех ПСД одной ОС или же ОС, предоставляющих программисту единый интерфейс (интерфейсы) взаимодействия программ с ОС. Минимальным требованием в рассматриваемом случае является использование единого интерфейса системных вызовов, например соответствующего стандартам POSIX для ОС реального времени (POSIX 1003.1a, POSIX 1003.1b и т. д.).

В этом случае большая часть ПО второго уровня ИИС КТМ будет унифицирована. К индивидуальным для ПСД каждой диагностики программным модулям будут относиться нетиповые алгоритмы предварительной обработки и драйверы модулей сбора данных. Кроме этого, при использовании одной ОС не нужно разрабатывать драйвер одного аппаратного устройства для разных ОС.

7.2. Программное обеспечение третьего и четвертого уровней ИИС

В состав третьего уровня ИИС входит сервер сбора и архивирования экспериментальных данных и сервер обработки и визуализации экспериментальных данных. К четвертому уровню ИИС относятся ЭВМ пульта ведущего физика и ЭВМ исследовательских лабораторий. ЭВМ доступа во внешние сети не входит в состав третьего и четвертого уровней ИИС. Архитектура ПО ЭВМ третьего и четвертого уровней ИИС показана на рис. КТМ.03.001.016.ТП.

Сервер сбора и архивирования данных. В составе ПО сервера сбора и архивирования данных третьего уровня ИИС (в дальнейшем сервер БДРИ) можно выделить следующие основные программные модули: модуль распределенного сбора данных; диспетчер разделяемой буферной памяти сервера БДРИ; ПО системы управления БДРИ; внешние программные интерфейсы к БДРИ; программные интерфейсы сетевого программирования и сбора данных.

Перечисленные программные модули обеспечивают выполнение следующих алгоритмов работы сервера БДРИ.

1. Сбор экспериментальной и технологической информации. Процедура сбора инициируется сервером по окончании разряда путем опроса содержимого буферных областей памяти ПСД второго уровня ИИС. Кроме этого, сервер запрашивает информационные массивы от СУП, СПЗ и СС, а также от стойки СУТП (здесь выборка данных производится только за интервал времени, соответствующий разряду).

2. Сохранение собранных данных в промежуточных файлах или в разделяемой буферной памяти. Буферизация на этом уровне необходима для построения оптимальных алгоритмов сохранения информации в БДРИ, учитывающих структуру потока запросов к базе данных при наличии внешних пользователей.

3. Сохранение измерительной информации в БДРИ.

4. Обеспечение внешнего доступа других вычислительных узлов САЭ к БДРИ для выполнения последующей обработки, представления и использования экспериментальной информации.

Для управления полученной в течение разряда информацией используется программа – диспетчер разделяемой памяти. Диспетчер разделяемой памяти выполняет группирование данных и синхронизацию программного доступа к областям буфера со стороны СУБД и программ оперативного отображения экспериментальных данных. После занесения экспериментальных данных в БДРИ доступ к буферу экспериментальных данных закрывается, и для получения данных требуется формировать запросы к БДРИ.

Для построения БДРИ выбрана СУБД PostgreSQL 7.3, как мощная, полнофункциональная, свободно-распространяемая СУБД. К основным достоинствам PostgreSQL можно отнести стопроцентную совместимость с ANSI SQL92, поддержку разнообразных форматов данных, высокую скорость выполнения транзакций, наличие модульной, легко конфигурируемой архитектуры.

За счет широких возможностей по реализации внешних программных интерфейсов доступа к данным, поддерживаемых PostgreSQL, а также развитых встроенных средств разработки собственных интерфейсов эта СУБД предоставляет прекрасные возможности для создания внешних программных интерфейсов доступа к БДРИ КТМ. В этом случае повышается качество разработки ПО и сокращаются сроки выполнения работ.

Учитывая высокие требования к надежности и детерминированности работы ПО сервера сбора и архивирования данных, в качестве платформы для разработки ПО сервера БДРИ выбрана ОС RedHat Linux 9.3. Выбор ОС Linux также определялся открытостью исходных текстов ОС.

Пульт ведущего физика. ПО ЭВМ пульта ведущего физика построено на основе ОС Windows 2000 и предназначено для решения следующих функциональных задач:

- реализация интерфейса с внешней БДРИ;
- представление информации о состоянии диагностического оборудования, о параметрах состояния рабочей камеры и результатах последнего эксперимента в графическом виде;

- обработка экспериментальной информации при помощи типовых алгоритмов (фильтрация, спектральный анализ, восстановление непрерывных функций по дискретным отсчетам, построение профилей и поверхностей и т. д.);
- обеспечение пользовательского интерфейса для создания и изменения программы следующего эксперимента.

Сервер обработки данных и визуализации. Основным узлом четвертого уровня ИИС является сервер обработки данных и визуализации. Эта ЭВМ работает под управлением ОС Windows 2000 в режиме сервера приложений и может использоваться для запуска задач обработки информации удаленными пользователями. Сервер используется для решения следующих задач:

- интерпретация программы эксперимента, подготовка файла паспорта разряда и его загрузка в подсистемы управления и сбора данных;
- обработка экспериментальной информации при помощи специальных алгоритмов (к таким алгоритмам относятся определение (реконструкция) различных физических полей, анализ излучений в широком спектральном диапазоне, обработка информации (сигналов) с ИК-камер и видеокамер и др.);
- реализация графического интерфейса, визуализация экспериментальных данных и результатов обработки;
- сохранение результатов обработки в различных форматах выходных данных: текстовые таблицы, графические файлы, двоичные файлы, форматы специализированных программ математической обработки информации.

ЭВМ доступа во внешние сети. Эта ЭВМ предназначена для создания различных документов, доступных для просмотра или копирования при помощи браузера Internet, в соответствии с запросами удаленных пользователей к БДРИ. ЭВМ доступа во внешние сети выполняет получение данных из БДРИ и производит все вычисления для обработки информации. При этом пользователю передаются уже готовые выходные документы, содержащие текстовую и числовую (табличный вид) информацию и выходные результаты в виде графиков (временные тренды, профили и поверхности).

ЭВМ исследовательских лабораторий. Использование в сети САЭ в качестве основного протокола TCP/IP и открытость программных интерфейсов позволяют организовать удаленный регламентированный доступ к ресурсам БДРИ и программам обработки экспериментальной информации из исследовательских лабораторий при помощи программных средств собственной обработки.

7.3. Интерфейсы прикладного программирования для доступа к данным ИИС

Одной из основных задач, решаемых ПО ИИС, является организация распределенной системы сбора и регистрации диагностической информации и обеспечение доступа обрабатывающих программ и пользователей к накопленным в БДРИ информационным массивам. В связи с тем, что число источников и потребителей информации велико, при создании ПО ИИС должны быть использованы серийные и кроссплатформенные программные средства и открытые алгоритмы. ПО сервера сбора, регистрации и архивирования данных работает в среде ОС Linux.

Для выполнения функций сетевой обработки и распределенного сбора данных в составе ПО ЭВМ архивирования и сбора данных выделяются программные интерфейсы `data_socket.api`, `raw_socket.api` (см. рис. КТМ.03.001.017.ТП). Интерфейс `raw_socket.api` (непосредственный доступ к коммуникационному протоколу) предусмотрен для обеспечения достижения максимальной скорости передачи и предназначен для передачи данных из БИПР второго уровня ИИС в СУП в реальном масштабе времени. Интерфейс `data_socket.api` используется для передачи данных от диагностических подсистем второго уровня ИИС на этапе межразрядной паузы. Интерфейс межпроцессного взаимодействия при помощи сокетов поддерживается также и в ОС Windows.

В состав ИИС КТМ входит сервер обработки данных и визуализации, работающий под управлением MS Windows 2000 Terminal server. Доступ к ресурсам сервера приложений осуществляется через терминальный сервис, а также через интерфейсы для обработки экспериментальных данных `das.api`. Программный интерфейс для доступа к функциям обработки данных `das.api` реализуется при помощи библиотек подпрограмм или исполняемых программных модулей. Данный программный интерфейс может использоваться также для создания системных и пользовательских программ, работающих в среде сервера обработки данных и визуализации и имеющих возможность доступа к данным БДРИ. Программный интерфейс сетевого программирования `das.api` реализуется с использованием механизма удаленного вызова процедур (RPC) или других, основанных на RPC технологиях (COM/DCOM). Таким образом, для разработки собственных программ, работающих в среде ПО ИИС, потребуется программный интерфейс (в виде подпрограмм и библиотек) `das.api` и среда разработки программ на любом алгоритмическом языке.

Для автономной работы с экспериментальными данными возможно создание средствами программных модулей сервера обработки данных

и визуализации выборок из БДРИ с сохранением результатов в виде промежуточных файлов (текстовые, с форматом специализированных программ обработки).

На многих экспериментальных установках как средство унификации доступа к ресурсам Fusion GRID используется система представления и обработки данных MDSplus. В ИИС должен быть реализован прозрачный доступ к БДРИ из MDSplus на основе интерфейса db.apı и механизма динамического создания деревьев разряда. Для организации доступа удаленного пользователя к информационным ресурсам БДРИ ИИС в стандарте MDSplus потребуются установка дополнительного сервера MDSplus.

В БДРИ предусмотрен механизм авторизации пользователя. Любые изменения, добавления и удаления в базе данных могут быть произведены только администратором или непосредственным владельцем данных.

7.4. Реализация доступа к базе данных результатов испытаний из системы MDSplus

MDSplus – это пакет программ, реализующий некоторые функции поддержки импульсного экспериментального цикла термоядерных установок типа токамак [2, 3].

При работе в полнофункциональном режиме MDSplus позволяет решать следующие основные задачи [2]:

- создание графического интерфейса к системе сбора данных и управления токамака для обслуживающего персонала;
- выполнение записи и хранения параметров технологических и измерительных систем и экспериментальных данных;
- задание параметров аппаратуры и программы проведения эксперимента;
- предоставление программных интерфейсов к пакетам прикладных программ математической обработки и научных расчетов и к программам, написанным на языках C, Fortran, IDL, Java;
- предоставление интерфейса доступа к базам данных для работы в качестве внешнего интерфейса представления данных.

MDSplus применяется на большинстве зарубежных термоядерных установок (Alcator C-Mod, DIII-D, FTU, NSTX, RFX и др.), однако во многих случаях используется только как дополнительный интерфейс к существующей базе экспериментальных данных.

Отказ от хранения экспериментальных данных средствами MDSplus и использования внешней базы данных позволяет значительно повысить скорость доступа, а также эффективно хранить огромный объем экспериментальной информации. Тенденция к использованию внешней СУБД совместно с MDSplus наблюдается фактически на всех тер-

моядерных установках. Например, на установке Acator-C Mod [33] первоначально данные хранились в виде иерархического дерева разряда, но в настоящее время для их хранения используется СУБД Oracle.

В соответствии с этим, в ИИС токамака КТМ предусматривается использование системы MDSplus в качестве дополнительного интерфейса к БДРИ. В этом случае потребуется обеспечить два основных режима доступа к БДРИ из MDSplus: режим доступа с дополнительных MDSplus рабочих станций и режим удаленного доступа через Internet с использованием MDSplus.

Использование собственных графических интерфейсов позволяет восполнить имеющиеся недостатки графического интерфейса MDSplus и более эффективно решать поставленные задачи. Одним из существенных ограничений MDSplus также является отсутствие русификации интерфейса. Вместе с тем, использование MDSplus в качестве дополнительного интерфейса позволит открыть унифицированный доступ к БДРИ КТМ иностранным специалистам, обеспечит возможность включения токамака КТМ в глобальную сеть проведения термоядерных исследований Fusion Grid [15] и будет способствовать привлечению зарубежных специалистов к работе на токамаке КТМ по программам совместного сотрудничества.

Рассмотрим архитектуру системы MDSplus и определим требования к разработке программного интерфейса для доступа к БДРИ КТМ.

Система MDSplus позволяет хранить информацию об импульсе в иерархической структуре, называемой деревом разряда. Элементами хранения дерева разряда являются параметры технологических измерительных систем, экспериментальные данные, результаты обработки, текстовые комментарии и ссылки на процедуры. В элементы дерева разряда можно записать вместо реально хранимых данных выражение на алгоритмическом языке TDI [9]. В это выражение может входить вызов подпрограммы, запрашивающей данные из альтернативной базы данных. В нашем случае, такой вызов нужно сформировать к системе управления БДРИ токамака КТМ.

Разработчики MDSplus предусмотрели многопользовательские режимы доступа к файлам данных экспериментальной установки с компьютеров локальной вычислительной сети и из Internet. При этом файлы данных хранятся на ЭВМ, работающей под управлением сервера данных MDSplus. Сервер данных MDSplus – это программа, обслуживающая запросы на чтение и редактирование деревьев разряда, поступающие от клиентских программ с удаленных ЭВМ.

Удаленная программа может установить два вида соединений с сервером данных.

В первом случае, перед выполнением каких-либо операций с деревом, программа явно устанавливает сетевое соединение с сервером путем вызова соответствующей подпрограммы. В этом случае все выражения на языке TDI интерпретируются на сервере, а клиентская программа получает лишь результаты запроса. Такая клиентская программа называется «легким клиентом» («thin client»).

Во втором случае в пользовательской программе нет установки явного сетевого соединения с сервером. Здесь операция открытия дерева и последующие манипуляции с ним отличаются от локального доступа к файлам только на уровне библиотек подпрограмм MDSplus. В переменной окружения <имя дерева>_path вместо имени директории указывается адрес сервера в формате <доменное имя/ip-адрес ЭВМ>:<номер порта>:. Это позволяет клиентской программе запрашивать и сохранять через сервер данные части файлов с деревьями. Таким образом, TDI-выражения интерпретируются самими подпрограммами доступа к MDSplus на «тяжелом клиенте» («thick client»).

У каждой из указанных схем есть свои достоинства и недостатки. В случае использования легкого клиента на клиентском компьютере устанавливается небольшой объем программ, и исключается дублирование информации из БДРИ. К недостаткам можно отнести увеличение нагрузки на сервер за счет выполнения TDI-выражений и загрузку вычислительной сети избыточными данными. При использовании тяжелого клиента необходимо выполнить полную инсталляцию MDSplus и используемых в TDI-выражениях библиотек подпрограмм на клиентский компьютер. Это позволяет снизить нагрузку на сервер и вычислительную сеть, но требует проведения синхронизации работы MDSplus на всех компьютерах [3]. Помимо этого, при запросе экспериментальных данных потребуется копировать все интересующие элементы дерева, которые для многих диагностик имеют размер 1 Мб, в связи с чем вопрос о загрузке сети избыточными данными остается открытым.

При работе с данными MDSplus клиентской программе доступны следующие основные операции [9].

- Connect. Открыть явное соединение с сервером данных в случае легкого клиента.
- Open. Открыть дерево с заданным именем и номером разряда.
- Value. Получить значение TDI-выражения.
- Put. Записать значение в данную позицию открытого дерева.
- Close. Закрыть открытое дерево.
- Disconnect. Закрыть открытое соединение с сервером данных.

Принципы взаимодействия MDSplus клиента с БДРИ токамака КТМ и архитектура программного интерфейса представлены на рис. КТМ.03.001.018.ТП.

БДРИ токамака КТМ размещается на сервере архивирования и сбора данных. На этой же ЭВМ установлена система MDSplus, представляющая два программных компонента – библиотеку `mdslib.so` и «Сервер данных MDSplus». Сервер данных MDSplus осуществляет переадресацию запросов, выполненных к элементам дерева разряда, вызывая функции доступа к БДРИ и предоставляя, таким образом, пользователю высокоуровневый проблемно-ориентированный доступ к экспериментальным данным и результатам их обработки в виде произвольных временных рядов, таблиц, профилей, поверхностей, графических и видеоданных, документов, а также таблиц переменной размерности. Пользовательские запросы к данным и параметрам физического эксперимента транслируются сервером в последовательность SQL запросов к реляционным таблицам БДРИ, и на основе выбранной информации формируются данные требуемого типа.

Со стороны MDSplus клиента все запросы к БДРИ выполняются точно так же, как и к любому MDSplus серверу. При использовании легкого клиента `MDS.api` формирует запрос к библиотеке `mdslib.DLL`, которая вызывает сетевой драйвер для установления сетевого соединения с сервером архивирования и сбора данных. Сформированный клиентом запрос принимается ЭВМ архивирования и сбора данных, передается программе «Сервер данных MDSplus». Сервер данных запускается с помощью стандартного демона `inetd` скриптом `mdsipd`, так что на каждое входящее соединение автоматически запускается порождаемый процесс – копия сервера. Для порождаемого процесса устанавливаются права доступа к дереву разряда в соответствии с информацией в файле `/etc/mdsip.hosts`.

Обеспечение поддержки интерфейса MDSplus на сервере архивирования и сбора данных позволит легко сконфигурировать на стороне клиента дополнительные программные интерфейсы MDSplus, к которым относятся интерфейсы языков C, Fortran, G (Labview), IDL, TCL [10, 11, 14], а также программные интерфейсы с системами математических и научных расчетов (Matlab [13]) и специализированными программами обработки результатов эксперимента EFIT, TRANSP [7, 8, 47]. Это позволит зарубежным специалистам использовать имеющиеся у них программы обработки и визуализации информации, а также работать с привычными для них программными интерфейсами. В заключение следует отметить, что последнее никак не исключает возможности параллельного использования на той же самой рабочей станции основных программных интерфейсов и программных средств обработки и визуализации ИИС КТМ, обеспечивая полнофункциональные возможности работы с системой.

РАЗДЕЛ 8. ПОДСИСТЕМЫ СБОРА ДАННЫХ ИИС

8.1. Подсистемы сбора данных технологических диагностик

В соответствии с исходными данными к проектированию, в состав второго уровня ИИС должны входить ПСД с датчиков 23-х диагностик, перечисленных в табл. 8.1.1–8.1.3.

Таблица 8.1.1

Перечень технологических диагностик

№ п/п	Наименование диагностики	Обозначение
1	Электромагнитная диагностика	ЭМД
2	Диагностика контактной тензометрии	ДКТ
3	Диагностика контактной термометрии	ДТМ
4	Анализатор остаточных газов	АОГ
5	Диагностика параметров ВЧ-генератора	ДВЧ.ген

Таблица 8.1.2

Перечень физических диагностик первой очереди внедрения

№ п/п	Наименование диагностики	Обозначение
1	Интерферометрия X-точки	ИХТ
2	Одноканальный интерферометр-рефрактометр	ОИ
3	Многоканальный интерферометр (тангенциальный)	ИМ
4	МГД-диагностика	МГД
5	Высокоскоростная камера для измерения потоков в диверторе	ИК.КАМ
6	Спектроскопия ВУФ-диапазона: обзорный спектрометр ВУФ спектрометр высокого разрешения ВУФ монитор рекомбинационной спектроскопии	СП.ОБЗ СП.ВР РС.ВУФ
7	Монитор Ha-Da	Ha-Da
8	Обзорный болометр радиационных потерь	ДПРП.обз
9	Корпускулярный анализатор	КОРП (Corp)
10	Двухчастотный радар-рефлектометр	МИРР_2ч (МИРР)

Таблица 8.1.3

Перечень физических диагностик второй очереди внедрения

№ п/п	Наименование диагностики	Обозначение
1	Рентгеновский монитор Те	SXR.Te.obz
2	Рентгеновская томография	РТС
3	Рентгеновский спектрометр	МРИ.СП
4	ДЖРИ	ДЖРИ
5	Сканирующий импульсный радар-рефлектометр	МИРР_СКАН (МИРР)
6	Камеры видеонаблюдения критических зон	В.КАМ
7	Многоканальная болометрия	ДПП.МЧ

Размещение ПСД перечисленных диагностик осуществляется в экспериментальном зале. Исключение составляют ПСД диагностики спектрометра высокого разрешения ВУФ и обзорного спектрометра ВУФ, размещаемые в прилегающем к экспериментальному залу помещении.

8.1.1. Подсистема сбора данных электромагнитной диагностики

Датчиками ЭМД являются магнитные зонды, петли, пояса Роговского, размещенные внутри вакуумной камеры токамака КТМ или на ней. Сигналы с датчиков нормируются и заводятся в ПСД, размещаемую в экспериментальном зале.

В ПСД выполняется аналоговая фильтрация, оцифровка и предварительная обработка сигналов.

Размещение и состав датчиков ЭМД определены в материалах технического проекта КТМ [6].

Состав измеряемых ПСД ЭМД-сигналов определен в табл. 8.1.1.1.

Таблица 8.1.1.1

Состав измеряемых ПСД ЭМД-сигналов

Обозначение измерительного канала	Кол-во каналов	Разъем подключения к диагностике	Разъем АЦП в ПСД
$V_p^{n1} \dots V_p^{n16}$	16	# 20 РСГС1 (1...32)	ADC1*, ADC2
$V_p^{n17} \dots V_p^{n32}$	16	# 20 РСГС2 (1...32)	ADC3, ADC4
$V_{pd}^{n1} \dots V_{pd}^{n5}$	6	# 20 РСГС1 (33...42)	ADC9 (1...10)
$V_{pd}^{c1} \dots V_{pd}^{c5}$	6	# 20 РСГС3 (33...42)	ADC10 (1...10)
$\psi_s1(A) \dots \psi_s16(A)$	16	# 20 РСГС5 (1...32)	ADC11, ADC12
$\psi_s1(B) \dots \psi_s16(B)$	16	# 12 РСГС11 (1...32)	ADC11, ADC12
I_p1	1	# 20 РСГС6 (1, 2)	ADC13 (1, 2)
I_p2	1	# 12 РСГС12 (1, 2)	ADC13 (1, 2)
$U_{p1} \dots U_{p10}$	10	# 20 РСГС6 (27...46)	ADC9 (23...32), ADC10 (11, 12)

Обозначение измерительного канала	Кол-во каналов	Разъем подключения к диагностике	Разъем АЦП в ПСД
$I_{P+V(1)}$	1	# 12 РСГС12 (3, 4)	ADC13 (3, 4)
$I_{P+V(2)}$	1	# 20 РСГС6 (3, 4)	ADC13 (3, 4)
$I_{pf1(A)} \dots I_{pf10(A)}$	10	# 12 РСГС12 (5...24)	ADC13 (5...32), ADC14 (1...30)
$I_{pf1(B)} \dots I_{pf10(B)}$	10	# 20 РСГС6 (5...24)	ADC13 (5...32), ADC14 (1...30)
$d\psi_{1(A)} \dots d\psi_{4(A)}$	4	# 12 РСГС7 (43...46)	ADC9 (15...22)
$d\psi_{1(B)} \dots d\psi_{4(B)}$	4	# 20 РСГС1 (43...46)	ADC9 (15...22)
$\delta\Phi_1, \delta\Phi_2$	2	# 20 РСГС6 (25, 26)	ADC9 (11...14)
$Vp^n1 \dots Vp^n16$	16	# 12 РСГС7 (1...32)	ADC1, ADC2
$Vp^n17 \dots Vp^n32$	16	# 12 РСГС8 (1...32)	ADC3, ADC4
$Vp^r1 \dots Vp^r16$	16	# 12 РСГС9 (1...32)	ADC5, ADC6
$Vp^r17 \dots Vp^r32$	16	# 12 РСГС10 (1...32)	ADC7, ADC8
$Vpd^n1 \dots Vpd^n5$	6	# 12 РСГС7 (33...42)	ADC9 (1...10)
$Vpd^r1 \dots Vpd^r5$	6	# 12 РСГС9 (33...42)	ADC10 (1...10)

При существующем размещении датчиков предлагается использовать для построения ПСД ЭМД два крейта, размещаемых в стойках на расстоянии ~ 3 м от вакуумной камеры в тех же секторах, где размещаются разъемы соответствующих датчиков ЭМД.

В состав крейтов ПСД ЭМД включены модули многоканальных АЦП и одна одноплатная ЭВМ на крейт. Общее количество АЦП для двух крейтов 14 шт. Структурная схема ПСД ЭМД представлена на рис. КТМ.03.001.027.ТП.

8.1.2. Подсистема сбора данных с датчиков контактной тензометрии

В результате взаимодействия электромагнитных полей и токов возникают пондеромоторные силы, действующие на обмотки ЭМС и вакуумную камеру установки КТМ. В общем случае в обмотках возникают изгибные и растягивающие напряжения. Эти напряжения воспринимаются силовой конструкцией ЭМС. Датчики контактной тензометрии предназначены для преобразования механических напряжений и деформаций вакуумной камеры, внутрикамерных элементов, обращенных к плазме, силовой конструкции и ЭМС, возникающих под воздействием мощных нестационарных электромагнитных полей и периодических термических напряжений, в электрический сигнал. Основными задачами, которые должна решать ПСД с датчиков контактной тензометрии, являются следующие:

- определение полей деформаций и напряжений;
- определение спектра частот анализируемого процесса;

- одновременное синхронное измерение сигналов со всех тензометров и регистрация величины деформаций и температур в памяти системы с учетом диапазонов их изменения.

Датчики контактной тензометрии располагаются на обмотках ЭМС, на вакуумной камере и элементах несущей конструкции.

Структурная схема ПСД контактной тензометрии представлена на рис. КТМ.03.001.036.ТП. Как показывает анализ современных измерительных систем, задачи, требующие одновременного ввода и обработки большого количества аналоговых сигналов, решаются с помощью модульных систем сбора данных. Для построения ПСД ДКТ предлагается использовать систему LTC российской фирмы «L-Card». LTC – это модульная система сбора данных с разнообразных датчиков и управления в задачах промышленной автоматизации. Широкая номенклатура модулей в системе LTC позволяет непосредственно подключаться ко всем основным типам промышленных датчиков, включая тензодатчики. Кроме того, у данной системы невысокая стоимость по сравнению с аналогами, производимыми другими фирмами.

8.1.3. Подсистема сбора данных с датчиков контактной термометрии

В состав ДТМ входят монтируемые на элементах конструкции вакуумной камеры и на каналах охлаждения кабельные термопары и линии связи с ПСД. Датчики температуры устанавливаются на поверхности вакуумной камеры и в местах болтовых соединений разъемных секций обмотки тороидального поля ТФ. На поверхности рабочей камеры в пределах укладки каждой ветви ленточного нагревателя установлено две термопары типа КТМС (ХА) ТУ 505.757-75. Для повышения надежности на каждый сектор вакуумной камеры монтируется резервная термопара.

Сигнал с термопар низковольтный (0–40 мВ), поэтому длина линий связи не должна превышать 10 м. Потенциал в месте установки термопар может составлять при пробое обмоток ЭМС более 1000 В, поэтому для нормализации сигнала необходимо использовать блоки предварительного усиления с гальванической развязкой входа от выхода. В связи с тем, что доступ к первичным преобразователям температуры будет затруднен из-за конструктивных особенностей камеры и обмоток ЭМС, разрабатываемая система должна иметь высокую надежность на уровне первичных преобразователей. Для уменьшения влияния магнитного поля на линии передачи сигналов с датчиков должен применяться провод типа «экранированная витая пара» с заземлением на одном конце, что обеспечивает ослабление помех до 70 дБ.

Получаемая с датчиков контактной термометрии информация используется в САЭ для выполнения следующих функций автоматизации:

- 1) регулируемый прогрев вакуумной камеры и патрубков в процессе подготовки установки КТМ к разрядам;
- 2) контроль температуры поверхности камеры и обмоток ЭМС в процессе плазменных разрядов и выполнение защитных действий при выходе температуры за регламентные значения;
- 3) выполнение температурной коррекции при обработке данных с тензодатчиков.

На рис. КТМ.03.001.038.ТП. показана структурная схема ПСД диагностики ДТМ, построенная с учетом отмеченных особенностей измерительных каналов. В нормирующем преобразователе сигналы термопар преобразуются в токовый сигнал (4–20 мА) и передаются по линии связи. Далее сигнал через блок гальванической развязки поступает на АЦП и в ЭВМ, где происходит его дальнейшая обработка.

Сбор данных с термопар обеспечивается БИПР. При этом БИПР размещаются в экспериментальном зале вблизи от вакуумной камеры для сокращения длины линий связи. На данных уровнях производится регистрация и первичная обработка информации. Информация с БИПР используется ЭВМ управления процессом вакуумно-технологической подготовки для реализации контуров управления температурой камеры и обмоток ЭМС. Передача информации с БИПР в ЭВМ управления процессом вакуумно-технологической подготовки осуществляется с использованием интерфейса RS-485. В связи с тем, что результаты измерения температуры должны применяться в системе контактной тензометрии для коррекции показаний тензодатчиков, необходимо организовать горизонтальный канал связи между ЭВМ управления процессом вакуумно-технологической подготовки и ЭВМ сбора данных с датчиков контактной тензометрии, используя сетевой коммутатор ИИС.

8.1.4. Подсистема сбора данных с анализатора остаточных газов

Системы анализа остаточных газов используются в дополнение к контролю вакуумной целостности установок термоядерного синтеза. Система анализа остаточных газов обеспечивает количественное измерение примесных газов, выделившихся в процессе выполнения очищающих процедур, таких как прогрев, очистка тлеющим разрядом и очистка плазменным разрядом. Система анализа остаточных газов также используется в качестве диагностики для изучения процессов взаимодействия «плазма-стенка», включая выделение примесного газа в те-

чение плазменных разрядов, и для изучения процессов водородно-дейтериевого обмена.

Для решения этой задачи широкое распространение получил масс-спектрометрический метод с разверткой выходного сигнала по массе ионов. Важную информацию также дает анализ временного изменения интенсивности одной линии атомной массы. По временной развертке можно судить о скорости откачки, о процессе поступления примесей со стенок в объем вакуумной камеры, о появлении течей в уплотнениях конструкций и о водородно-дейтериевом соотношении в процессе разряда.

Требуемый диапазон атомных масс, регистрируемых подсистемой анализа остаточных газов, составляет 1–200 а.е.м. При этом чувствительность по атомной массе должна составлять 0,01 а.е.м.

При исследовании быстропротекающих процессов, таких, как изучение плазмы, на практике используют ВМПС-спектрометры, реализующие время-амплитудную методику анализа ионов по массам.

Базовыми подсистемами времяпролетных масс-спектрометров являются следующие:

- интерфейс ионизации;
- ускоритель-анализатор ионов (ионная оптика);
- детектор ионов с системой питания;
- вакуумная система;
- система регистрации и первичной обработки информации.

На рис. КТМ.03.001.030.ТП. изображена структура подсистемы сбора времяпролетного масс-спектрометрического газоанализатора элементного анализа. Интерфейс ионизации содержит исполнительные устройства подачи газовой пробы, систему управления электронным пучком и введения ионов в анализатор. Первая подсистема включает запорно-вентильную и дозирующую арматуру. Далее необходимо обеспечить несколько напряжений формирования и управления электронным пучком. Характерные времена, необходимые для ионизации, определяются геометрическими размерами области, облучаемой пучком, наибольшей массой анализируемого вещества и величиной импульса, выталкивающего ионы в область анализа (нужно, чтобы за время ионизации самые тяжелые частицы вышли из области ионизации в область анализа). Используются напряжения в сотни и тысячи вольт и длительностью импульсов от сотен наносекунд до десятков микросекунд.

Ускоритель представляет собой ионно-оптическую систему, в простейшем случае состоящую из импульсного ускоряющего поля и после-

довательности электростатических элементов дефлектора, пространства дрейфа, замедлителя для сброса энергии после первой плоскости пространственно-временной фокусировки и ионного зеркала, так называемого рефлектрона. Этот элемент обеспечивает увеличение разрешающей способности спектрометра с нескольких сотен до нескольких тысяч на один рефлектрон. Напряжения элементов ионной оптики связаны между собой и зависят от диапазона анализируемых масс. За счет их варьирования можно выбирать режимы, различающиеся диапазоном масс, скоростью и точностью анализа.

8.1.5. Подсистема сбора данных о параметрах высокочастотных генераторов

ВЧ-нагрев плазмы в установках токамак на гармониках ионноциклотронного резонанса (ИЦР нагрев) в диапазоне частот 30–150 МГц является наиболее эффективным методом и рассматривается также как один из способов поддержания тока плазмы.

Система управления ВЧ-генератора обеспечивает синхронизацию работы ВЧ-генератора с другими системами токамака. Кроме того, для контроля работы установки необходимо получать информацию о переданной в плазму ВЧ-мощности. Этого можно добиться, измеряя значения проходящей и отраженной мощности в каждом из фидерных трактов передачи энергии от генераторов к антеннам и контролируя энерго-содержание плазмы.

Для обеспечения требуемого режима работы ВЧ-генератора необходимо выполнять автоматическое измерение следующих параметров:

- величина проходящей к антеннам мощности (P_{in}) и величина отраженной мощности (P_{out}) для каждого ВЧ-генератора;
- напряжение анодного (U_a) питания;
- напряжение на выходе ИАП;
- постоянные составляющие токов анода (I_a) и катода (I_k) генераторных ламп;
- пиковое напряжение на антенне;
- частота колебаний (f_g).

Диапазоны значений измеряемых и контролируемых рабочих параметров ВЧ-генератора приведены в табл. 8.1.5.1. Структурная схема БИПР ПСД ВЧ-генератора приведена в ведомости чертежей (рис. КТМ.03.001.053.ТП).

Таблица 8.1.5.1

Измеряемые и управляемые параметры ВЧ-генератора

Параметр	Шт.	Диапазон	Динамические характеристики	Погрешность	Первичный преобразователь
Ток анода	4 × 2	0–150 А	120 А/мс	1 %	датчик Холла
Ток катода	4 × 2	0–700 А	–	–	датчик Холла
Проходящая мощность	16	0–1 МВт	1 МВт/мс	1,5 %	направленный ответвитель + термистор
Отраженная мощность	16	0–1 МВт	1 МВт/мс	1,5 %	направленный ответвитель + термистор
Пиковое напряжение на антенне	4 × 1	0–15 кВ	15 кВ/мс	1 %	датчик напряжения + пиковый детектор
Частота генерации	4 × 1	0–30 МГц	–	1 %	демпфированный датчик напряжения
Расход воды в эквиваленте нагрузки	1	0–10 м ³ /ч	–	–	расходомер
Температура воды:					
· на входе в эквивалентную нагрузку;	1	0–100 °С	–	3 %	термометр сопротивления
· на выходе из эквивалентной нагрузки	1	0–100 °С	–	3 %	термометр сопротивления
Включение и отключение источника накала	1	0–700 А	0,70 с / 0,08 с	–	вакуумный контактор
Подключение и отключение имитатора нагрузки	4 × 1	0–1 МВт	0,70 с / 0,08 с	–	вакуумный контактор

8.2. Подсистемы сбора данных физических диагностик

8.2.1. Подсистема сбора данных одноканального интерферометра-рефрактометра

Структурная схема ОИ представлена на рис. 8.2.1.1.

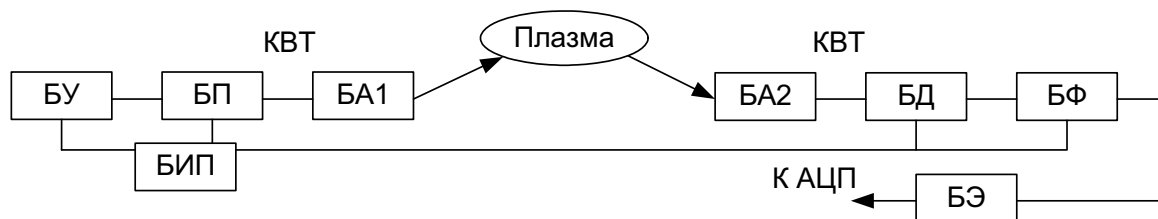


Рис. 8.2.1.1. Структурная схема ОИ:

БУ – блок управления и контроля; БП – блок передатчиков; БА1 – блок передающих антенн; БА2 – блок приемных антенн; БД – блок детекторов с предусилителями; КВТ – квазиоптический и волноводный тракты; БФ – блок формирователей; БЭ – блок электроники; БИП – блок источников питания; АЦП – аналого-цифровой преобразователь (размеры всех блоков, кроме блока антенн и КВТ, не превышают $20 \times 10 \times 15 \text{ см}^3$ для каждого)

В основу работы ОИ-рефрактометра заложена времяпролетная методика. Плотность электронов вдоль хорды наблюдения определяется по времени пролета СВЧ-импульса через плазму. Схема размещения диагностического оборудования и ПСД показана на чертеже КТМ.03.001.028.ТП.

Излучение вводится по центральной хорде. Отраженное от стенки вакуумной камеры излучение принимается по трем хордам: центральной, нижней и верхней. Дополнительная информация позволяет достичь требуемой точности измерения средней плотности, а также определять смещение плазмы в вертикальном направлении.

Структура ПСД интерферометра-рефрактометра показана на чертеже КТМ.03.001.039.ТП. Время пролета СВЧ-импульса определяется путем детектирования отраженного и опорного сигналов, выполнения привязки к их переднему фронту (блок ФСП), формирования сигналов запуска/останова на ВАП.

Сигнал с выхода ВАП подается на вход АЦП. При частоте следования импульсов 1 МГц частота оцифровки по каждому каналу должна быть не меньше 1 МГц.

Использование информации с интерферометра-рефрактометра в СУП определяет требование к созданию независимого канала передачи данных из ПСД МИРР в СУП. Помимо этого, в подсистеме используется второй канал передачи для сохранения результатов измерений в БДРИ КТМ после окончания разряда.

Синхронность проведения измерений обеспечивается благодаря использованию в составе подсистемы ЛМС, связанного с ЦБС оптоволоконным каналом передачи синхросигналов единого времени эксперимента и кодов синхрокоманд.

8.2.2. Подсистема сбора данных многочастотного импульсного радар-рефлектометра

Принцип действия многочастотного импульсного РР состоит в последовательном зондировании плазмы СВЧ-импульсами с фиксированной частотой (двухчастотный импульсный РР) и выполнении быстрого свипирования частоты СВЧ-генератора (РР со сканированием частоты).

Измерение времени пролета каждого импульса двухчастотного РР позволяет определить значение плотности электронов в двух точках на границе плазмы в направлении большого радиуса токамака КТМ.

Для РР со сканированием частоты предусмотрено два режима работы. В первом режиме работы установленный на выходе свипируемого генератора модулятор формирует короткие СВЧ-импульсы. Количество формируемых импульсов равно 9. При работе в данном режиме один свипируемый генератор с модулятором заменяет 9 СВЧ-генераторов с фиксированной частотой.

При работе во втором режиме модулятор отключен, и на приемной стороне измеряется частота биения между сигналом, отраженным плазмой, и сигналом с выхода свипируемого СВЧ-генератора. Цифровая обработка сигнала позволяет провести детальное восстановление средней части профиля плотности электронов $n_e(r)$.

Структурная схема РР показана на рис. 8.2.2.1.

Измерение времени пролета СВЧ-импульса выполняется в два этапа. На первом этапе отраженный и опорный СВЧ-сигналы (длительность ~ 10 нс, время нарастания $\sim 1,5$ нс) детектируются, усиливаются и передаются на ФСП. ФСП обеспечивают точную привязку к середине переднего фронта СВЧ-импульсов и передают сигналы на вход ВАП. Измеряемый интервал времени преобразуется в электрический сигнал постоянного уровня и подается на АЦП.

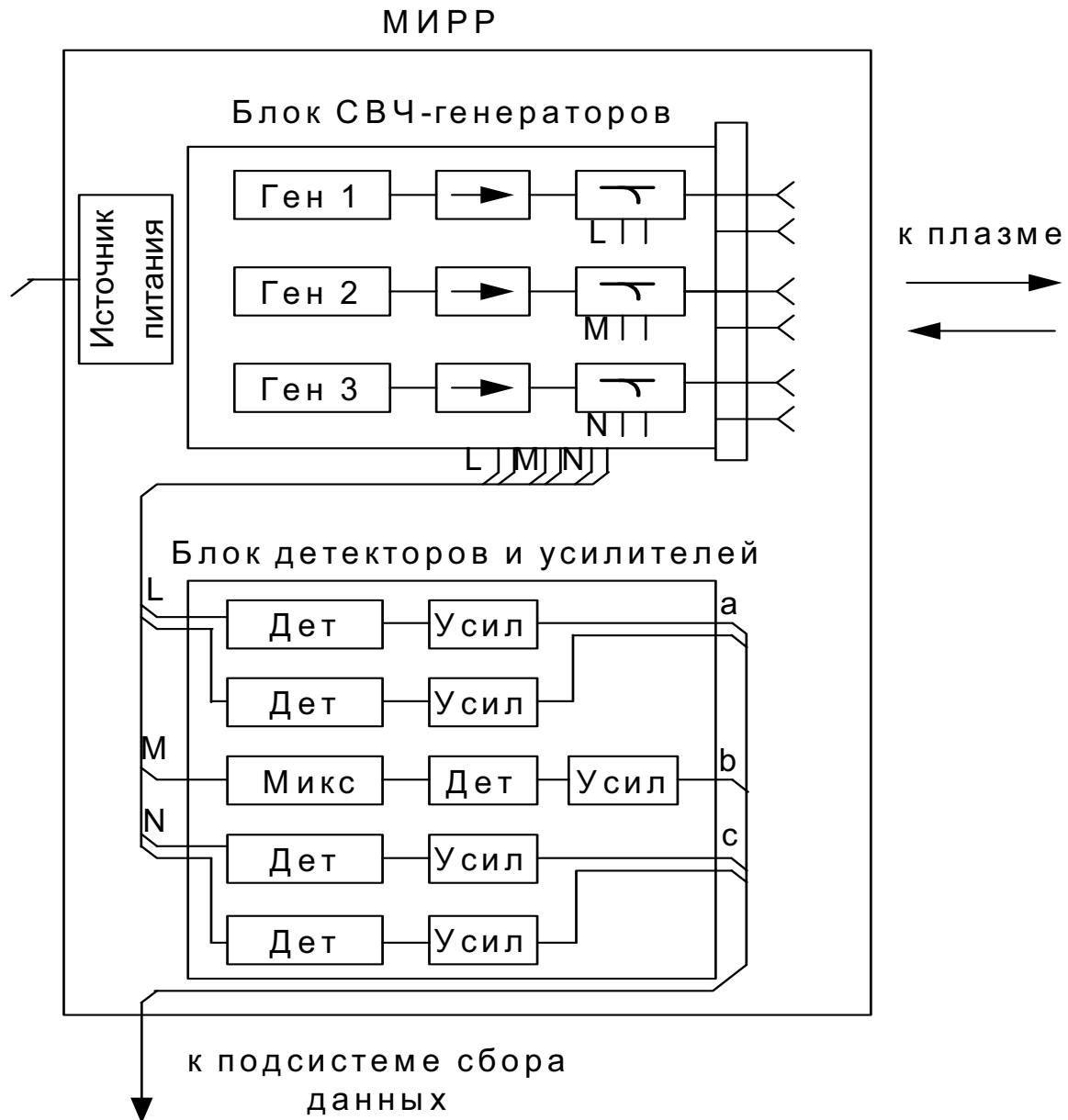


Рис. 8.2.2.1. Структурная схема РР

При проведении детального восстановления профиля плотности электронов создаваемый свипируемым генератором сигнал пропускается через плазму и нелинейно складывается вместе с сигналом, формируемым этим же самым генератором, поступающим в миксер (Микс). Использование миксера (смесителя) позволяет сформировать сигнал частоты биения и, выполнив его цифровую обработку, найти детальный профиль плотности электронов $n_e(r)$.

Структурная схема ПСД представлена на рис. 8.2.2.2 и на чертеже КТМ.03.001.032.ТП.

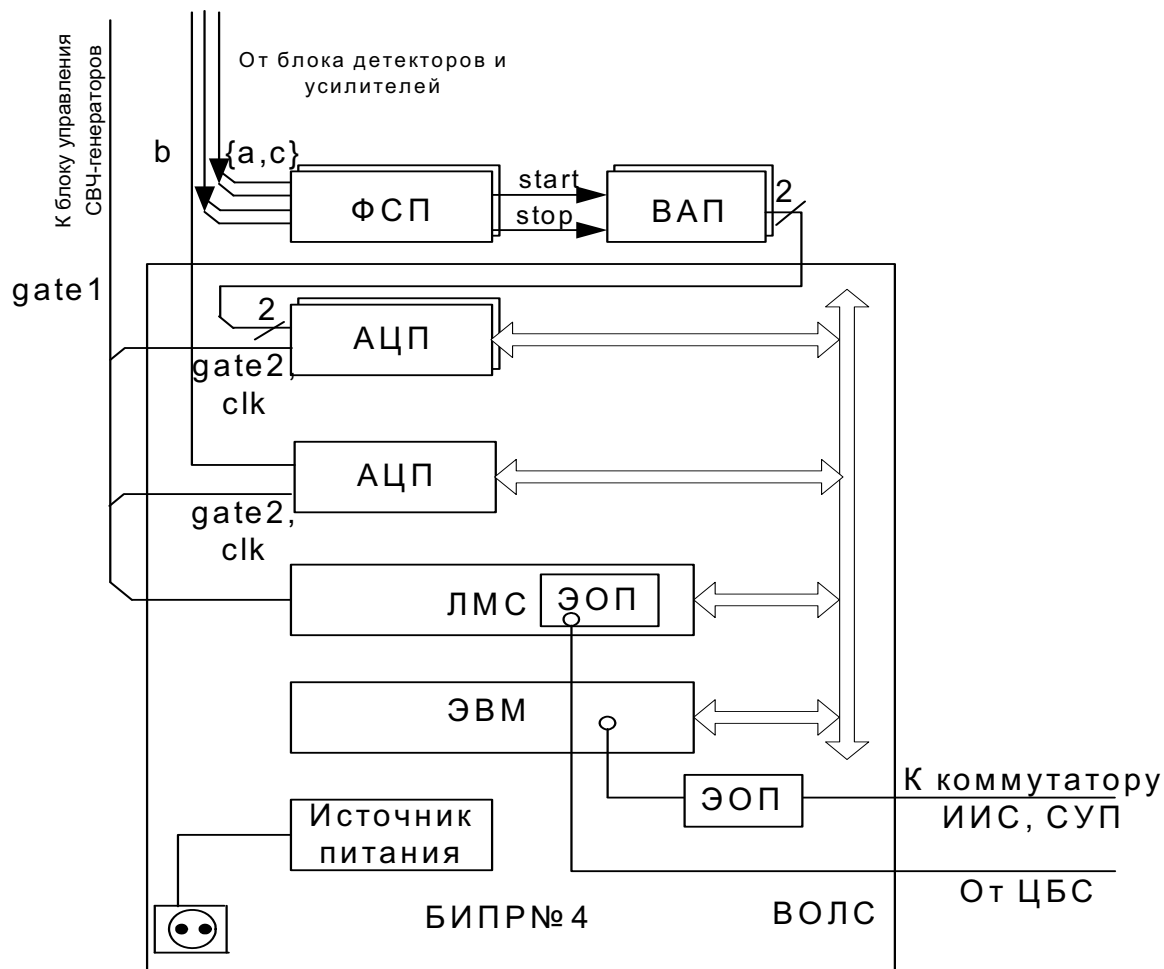


Рис. 8.2.2.2. Структурная схема ПСД

8.2.3. Подсистема сбора данных монитора На-Да излучения и обзорного спектрометра тормозного излучения видимого и ультрафиолетового диапазонов

Монитор На-Да детектирует излучение Бальмеровских линий изотопов водорода На (656,3 нм) и Да (656,1 нм) вдоль выбранных хорд наблюдения. Диагностика собирает свет вдоль выбранных 10-ти хорд наблюдения, пропускает его через интерференционные фильтры с полосой пропускания 2 нм и транспортирует его к ФЭУ по оптоволоконным линиям связи. В состав диагностики также входят блоки нормирующих преобразователей, приводящие сигналы с выходов ФЭУ к унифицированному диапазону изменения.

Структурная схема монитора На-Да представлена на рис. 8.2.3.1.

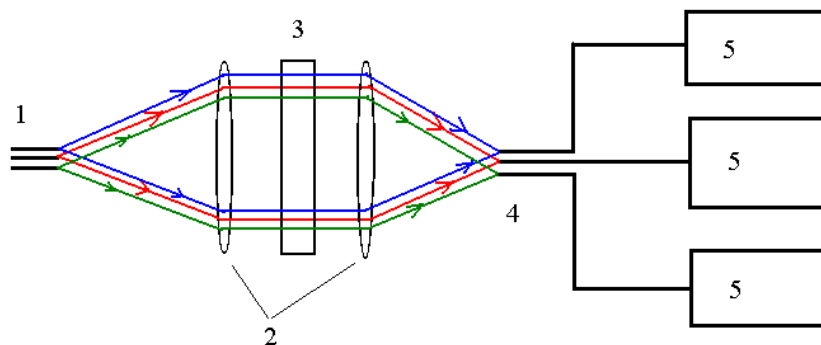


Рис. 8.2.3.1. Структурная схема монитора Na-Da:

1 – световоды, приходящие с установки и собирающие свет по разным хордам наблюдения; 2 – объектив, создает для каждого световода параллельные пучки света, которые проходят через интерференционный фильтр – 3; второй объектив – 2 – собирает свет на систему световодов; 4 – световоды; 5 – ФЭУ и предусилители

Обзорный монитор тормозного излучения видимого и УФ-диапазонов детектирует спектральные линии $\lambda = 656,3$ нм вдоль выбранных хорд наблюдения и имеет спектральную ширину пропускания интерференционных световых фильтров 2 нм. Состав диагностики полностью аналогичен составу диагностики Na-Da.

Структурная схема монитора тормозного излучения видимого и УФ-диапазонов представлена на рис. 8.2.3.2.

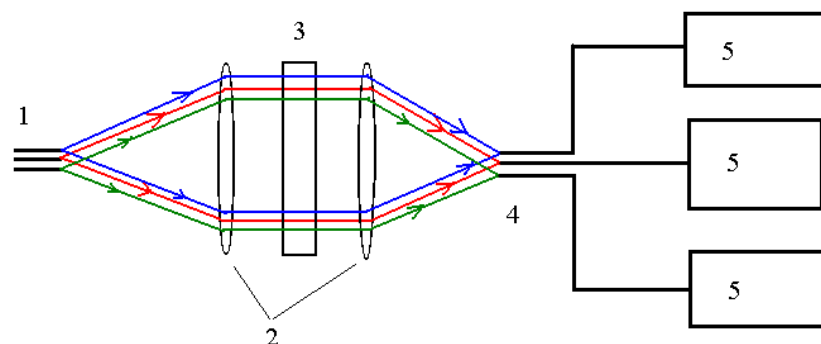


Рис. 8.2.3.2. Структурная схема тормозного излучения ВУФ-диапазона:

1 – световоды, приходящие с установки и собирающие свет по разным хордам наблюдения; 2 – объектив, создает для каждого световода параллельные пучки света, которые проходят через интерференционный фильтр – 3; второй объектив – 2 – собирает свет на систему световодов; 4 – световоды; 5 – ФЭУ и предусилители

Схема размещения монитора Na-Da (обозначена D3), монитора тормозного излучения видимого и УФ-диапазонов (D13a) и ПСД (БИПР № 5) представлена на рис. КТМ.03.001.029.ТП.

Состав измерительных каналов и динамические характеристики сигналов диагностики Na-Da приведены в табл. 8.2.3.1.

Таблица 8.2.3.1

Динамические характеристики сигналов диагностики На-Да

Обозначение измерительных каналов	Временное разрешение, требования изготовителей диагностики	Принимаемое временное разрешение
На-Да.1 – На-Да.2	не хуже 5 мкс, желательно 1 мкс	1 мкс
На-Да.3 – На-Да.10	не хуже 1 мс	1 мкс

Состав измерительных каналов обзорного спектрометра тормозного излучения видимого и УФ-диапазонов представлен в табл. 8.2.3.2.

Таблица 8.2.3.2

Динамические характеристики сигналов спектрометра тормозного излучения ВУФ-диапазона

Обозначение измерительных каналов	Временное разрешение, требования изготовителей диагностики	Принимаемое временное разрешение
VUV.mon.1 – VUV.mon.10	1 мкс	1 мкс

Структурная схема комбинированной ПСД диагностик На-Да и монитора тормозного излучения видимого и УФ-диапазонов представлена на рис. КТМ.03.001.041.ТП.

8.2.4. Подсистема сбора данных диагностик «обзорный спектрометр ВУФ», «спектрометр высокого разрешения ВУФ»

Структурная схема диагностики «обзорный спектрометр ВУФ» представлена на рис. 8.2.4.1. Спектрометр высокого разрешения имеет аналогичную структуру.

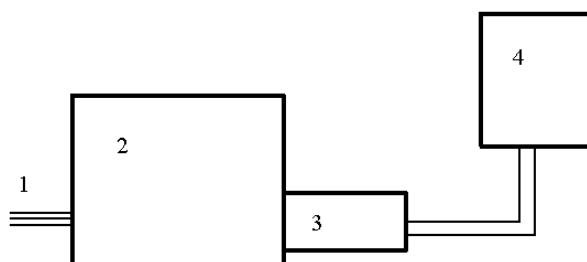


Рис. 8.2.4.1. Структурная схема диагностики «обзорный спектрометр ВУФ»: 1 – набор световодов, приходящих с установки; 2 – светосильный спектральный прибор высокого разрешения; 3 – блок считывающей электроники, в составе – усилитель яркости, ПЗС-матрица, считывающая электроника; 4 – ПСД

Оптическое излучение плазмы собирается оптикой вдоль выбранных хорд наблюдения и транспортируется по ВОЛС к спектрометрам, размещаемым в прилегающем к экспериментальному залу помещении.

В спектрометрах излучение поступает на дифракционную решетку, оптический усилитель и ПЗС-матрицу. При наличии 10-ти хорд наблюдения ПЗС-матрица регистрирует за один временной срез 10 соответствующих спектров. Временное разрешение ограничено скоростью считывания информации с ПЗС-матрицы.

Основные требования к параметрам систем регистрации спектрометров приведены в табл. 8.2.4.1.

Таблица 8.2.4.1

Требования к параметрам систем регистрации спектрометров

Название диагностики	Требования к параметрам системы регистрации разработчиков диагностики	Дополнительные требования
Обзорный спектрометр ВУФ	рабочий спектральный диапазон 300–900 нм; спектральное разрешение 1 нм; кол-во хорд наблюдения 10; временное разрешение не хуже 4 мс; разрядность АЦП 14–16 бит	Кол-во пикселей ПЗС-матрицы по горизонтали не меньше 600
Спектрометр высокого разрешения ВУФ	рабочий спектральный диапазон 250–850; спектральное окно 20 нм; спектральное разрешение 0,02 нм; кол-во хорд наблюдения 10; временное разрешение не хуже 4 мс; разрядность АЦП 14–16 бит	Кол-во пикселей ПЗС-матрицы по горизонтали не меньше 1024

Структурная схема ПСД приведена на рис. КТМ.03.001.034.ТП. В составе ПСД используется единственный модуль УСО для ввода сигналов с блока считывающей электроники (Блок 1.3) диагностики СП.ОБЗ. При этом следует отметить, что высокое временное и спектральное разрешение определяют требования к высокой скорости считывания информации с ПЗС-матрицы и, соответственно, к модулю УСО БИПР СП.ОБЗ. Для передачи данных со спектрометра предлагается использовать цифровой интерфейс Camera Link. В качестве модуля УСО выбрана плата цифрового ввода изображения RT-644.

8.2.5. Подсистема сбора данных с инфракрасных камер и видеокамер наблюдения критических зон токамака КТМ

8.2.5.1. Подсистема сбора данных с высокоскоростной инфракрасной камеры и видеокамеры наблюдения тепловых потоков на дивертор КТМ

При тепловых потоках 3–15 Вт/см² максимум теплового излучения дивертора токамака КТМ будет находиться как в ИК-области спектра (начало разряда, межразрядная пауза), так и в видимом диапазоне спектра (основное время разряда). Динамика процесса нагрева неизвестна, поэтому исследуемая область диверторных пластин будет одновременно наблюдаться и в видимой, и в ИК-области спектра с высоким временным и пространственным разрешением. Область наблюдения диверторных пластин предлагается выбрать в тангенциальном направлении, с обзором через горизонтальный патрубок. С точки зрения исследования тепловых нагрузок на внутрикамерные элементы КТМ большой интерес представляют диверторные пластины, размещенные в одних секторах с антеннами ВЧ-нагрева. При этом высокоскоростные ИК-камеры и видеокамеры закрепляются рядом на фланце горизонтального патрубка и фокусируются фактически на одну и ту же область дивертора.

Предлагаемое решение позволяет исследовать процессы нагрева и охлаждения диверторных пластин в широком температурном диапазоне с высоким временным разрешением. На начальном этапе разряда температура дивертора относительно низкая, и все испускаемое излучение будет лежать в ИК-спектральном диапазоне. После выхода на плато тока ($I_p = 750$ кА) температура дивертора быстро нарастает, и значительная часть излучения испускается в видимом спектральном диапазоне. После окончания разряда диверторные пластины медленно остывают, и основная часть излучения повторно переходит в ИК-диапазон. В соответствии с этим проведение измерений продолжается и после окончания разряда. Окончание измерений может выполняться в заранее определенный момент или по команде ведущего физика. В последнем случае измерительная информация должна отображаться в реальном масштабе времени на пульте ведущего физика.

Предварительно выбрана ИК-камера, работающая в спектральном диапазоне 5–13 мкм (ближний ИК-диапазон), и видеокамера со спектральным диапазоном 0,8–1,1 мкм. Временное разрешение для ИК-камеры составляет 330 кадров/с, для видеокамеры – 1000 кадров/с. Для сопоставления результатов измерения обеих камер требуется обеспечить синхронность их работы. Для внешней синхронизации камер предусмотрено использование сигналов из СС токамака КТМ.

Структура диагностического оборудования и ПСД представлена на рис. КТМ.03.001.035.ТП. Сигнал из СС поступает в ЛМС ПСД, который формирует сигналы локальной синхронизации для плат ввода изображений с ИК-камер и видеокамер. По линиям связи с ИК-камерами и видеокамерами передаются не только измерительные сигналы, но и сигналы синхронизации работы камер. Обе камеры полностью цифровые. Цифровой интерфейс связи с камерами соответствует стандарту Camera Link. При высоком уровне помех питание камеры во время разряда может выполняться от автономного аккумуляторного ИП (5В, 3А), входящего в состав камеры. Внешнее питание (5В, 3А) подводится к камере во время подготовки к разряду по отдельному кабелю.

При проведении измерений информация с видеокамеры поступает на вход платы ввода изображений и по системной шине передается в одноплатную ЭВМ. Далее измерительная информация передается в реальном масштабе времени по сети Ethernet 100BaseFX на верхний уровень ИИС для отображения на пульте коллективного пользования.

8.2.5.2. Подсистема сбора данных дополнительных видеокамер наблюдения критических зон КТМ

К дополнительным областям наблюдения могут быть отнесены такие внутренние элементы конструкции вакуумной камеры, как антенны ВЧ-нагрева, стенки вакуумной камеры, дополнительные области исследования диверторных пластин.

Для видеонаблюдения перечисленных областей запланировано использование 4-х видеокамер с временным разрешением не хуже 100 кадров/с.

Проектные решения по построению ПСД с видеокамер наблюдения критических зон не будут существенно отличаться по сравнению с рассмотренным выше решением по построению подсистемы сбора диагностики с высокоскоростных ИК-камер и видеокамер.

Структурная схема ПСД дополнительных камер видеонаблюдения критических зон токамака КТМ представлена на рис. КТМ.03.001.036.ТП.

8.2.6. Подсистема сбора данных магнетогидродинамической диагностики

МГД-диагностика на установке необходима для исследования корреляции между интенсивностью радиационных потерь, тепловых потоков, вытекающих на диафрагму, и развитием МГД-возмущений плазмы (развитие неустойчивости срыва, запертой моды и др.). Вследствие того, что большинство аварийных ситуаций, связанных с плазмой (срывы и т. п.),

обусловлены МГД-активностью плазмы, целесообразно использовать информацию с МГД-диагностики КТМ в СПЗ для формирования сигналов – «предвестников» срывов.

Для реализации перечисленных измерений необходимо размещение значительного числа магнитных зондов, регистрирующих полоидальную компоненту магнитного поля, в двух полоидальных сечениях камеры, разнесенных вдоль тора. Магнитные зонды должны иметь высокое временное разрешение для обеспечения регистрации быстрых процессов.

Набор магнитных зондов выполняется в виде двух одинаковых линеек, разнесенных в тороидальном направлении. Для обеспечения защиты и быстродействия магнитные зонды размещаются в металлических трубках, которые установлены внутри камеры вдоль полоидального обхода, трубки открыты на атмосферу. На выходе зонда используется РС-ячейка с целью обеспечения максимального разрешения сигнала в диапазоне преобразования АЦП как до срыва, так и в самом срыве, в течение которого происходит многократное увеличение амплитуды и частоты сигнала. Восстановление значения самого поля B_r (флуктуации поля \tilde{B}_r) осуществляется численным интегрированием сигнала магнитного зонда с учетом постоянной времени τ защитной трубки, в которой размещены магнитные зонды, и постоянной времени РС-ячейки. Учитывая фазовую асимметрию возмущения магнитного поля тока, определяется амплитуда и фаза соответствующей гармоники m . Для определения значения тороидальных номеров мод n используются одновременно две линейки зондов.

Требования к системе сбора данных:

- число синхронных каналов регистрации – 64;
- разрядность АЦП – 12 бит;
- частота дискретизации – до 5 МГц;
- дифференциальный прием входных сигналов;
- диапазоны входных сигналов – ± 5 В; $\pm 2,5$ В; ± 1 В; $\pm 0,5$ В;
- смещение нуля шкалы преобразования;
- входное сопротивление АЦП – 50 Ом и/или 100 кОм;
- объем буферной памяти на канал – 1 М отсчетов;
- режимы работы – непрерывный и непрерывный с предысторией;
- канал связи с базовым компьютером – Ethernet 100.

При существующем размещении датчиков предлагается использовать для построения ПСД МГД два крейта, размещаемых в стойках на расстоянии ~ 3 м от вакуумной камеры, в тех же секторах, где размещаются разъемы соответствующих датчиков МГД.

В состав крейтов ПСД МГД включены модули многоканальных АЦП и одна одноплатная ЭВМ на крейт. Структурная схема ПСД МГД представлена на рис. КТМ.03.001.037.ТП.

8.2.7. Подсистема сбора данных диагностики жесткого рентгеновского излучения

Подсистема сбора и обработки данных ДЖРИ предназначена для измерения потоков и спектров жесткого рентгеновского излучения плазмы установки токамак КТМ. Наличие тороидального вихревого поля приводит к появлению в плазме убегающих электронов. Сталкиваясь с твердым препятствием, электроны порождают жесткое рентгеновское излучение, исследование которого дает возможность судить о поведении ускоренных электронов в плазме. Измерение жесткого рентгеновского излучения позволяет выполнить построение системы защиты и обработки связей для обеспечения устойчивости плазменного шнура.

Метрологические характеристики измерительного канала регистрации жесткого рентгеновского излучения должны быть следующими:

- динамический диапазон измерения 0–100 кГц;
- допускаемая погрешность измерительного канала < 5 %;
- энергия квантов в диапазоне 50–5000 КэВ.

ДЖРИ размещается на массивной подставке или на полу в экспериментальном зале. В угол обзора детекторов должна попадать вся вакуумная камера. Схема размещения диагностики представлена на рис. 8.2.7.1.

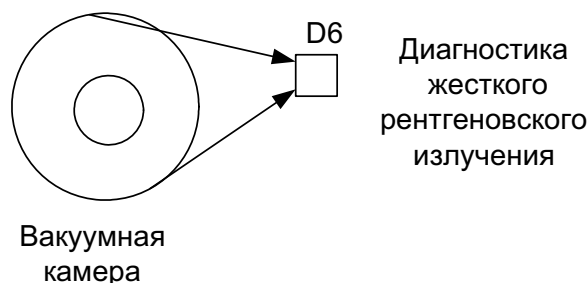


Рис. 8.2.7.1. Структурная схема ДЖРИ

В состав ДЖРИ входят два полупроводниковых Si(Li) детектора, предусилители, свинцовый внешний экран и линии связи к ПСД.

Структурная схема ПСД ДЖРИ представлена на рис. КТМ.03.001.038.ТП. Сигналы с предусилителей по кабельной линии связи передаются в БИПР. БИПР ПСД ДЖРИ состоит из блока нормирующих преобразователей, дискриминаторов формы, АЦП, промышленной ЭВМ и модуля локальной синхронизации. Суммирование сигналов и разделение составляющих осуществляется дискриминатором формы. Сбор и передачу данных в СПЗ и на третий уровень ИИС выполняет промышленная ЭВМ на базе процессорного модуля PCA-6004 фирмы Advantech.

8.2.8. Подсистема сбора данных рентгеновской томографической системы

В состав диагностики мягкого рентгеновского излучения входят три камеры-обскуры, размещаемые в одном сечении вакуумной камеры токамака КТМ (рис. КТМ.03.001.023.ТП), и кабельные линии связи для передачи измерительных сигналов и выполнения питания детекторов и предусилителей. Внутри камеры-обскуры параллельно размещаются две 32-элементные линейки полупроводниковых детекторов и предусилители.

В качестве детектора предлагается использовать 32-элементную линейку полупроводниковых детекторов AXUV (IRD. Inc.), обеспечивающую измерение рентгеновского излучения в диапазоне энергий 1–10 КэВ с плотностью потока 10^6 – 10^9 квант/с·см² и формирующую токовый сигнал с полосой частот, перекрывающей динамический диапазон 0–200 кГц. Предусилитель представляет собой преобразователь «ток-напряжение» с автоматической компенсацией темнового тока детектора (10^{-10} А) и стабилизацией базовой линии. Коэффициент преобразования предусилителя ~ 100 А/В, полоса пропускания 0–200 кГц. Настройка коэффициента усиления выполняется из условия нормировки выходного сигнала предусилителя на диапазон 0–1 В. Сигналы с предусилителей выводятся из камеры-обскуры и передаются по кабельным линиям связи в ПСД диагностики «рентгеновская томографическая система».

Структурная схема ПСД представлена на рис. КТМ.03.001.039.ТП. В состав ПСД РТС входят модули многоканальных АЦП, одноплатная ЭВМ, ЛМС и ИП для предусилителей и детекторов. Сигналы с предусилителей поступают на входы АЦП, оцифровываются и сохраняются в буферной памяти АЦП. По мере заполнения буфера АЦП выполняется передача и сохранение всей измерительной информации в оперативной памяти одноплатной ЭВМ. После окончания разряда измерительная информация передается из оперативной памяти одноплатной ЭВМ на третий уровень ИИС. Синхронизация проведения измерений модулями АЦП обеспечивается благодаря использованию ЛМС. ЛМС формирует сигналы внешней синхронизации для модулей АЦП, тем самым обеспечивая одновременность проведения измерений. В свою очередь, ЛМС работает синхронно с ЦБС, что обеспечивает привязку проводимых измерений к единому времени эксперимента.

8.2.9. Подсистема сбора данных диагностики «многоканальная болометрия»

ПСД с диагностики полных радиационных потерь предназначена для получения информации об интегральном значении потерь энергии через переизлучение, а также профиля потерь для выяснения транспорта примесей. В КТМ предусмотрено два набора датчиков в горизонтальном и экваториальном патрубке. Исходя из назначения установки, целе-

сообразна установка дополнительных наборов датчиков для лучшего обзора в диверторной области. Возможны следующие комбинации первичных преобразователей для повышения динамического диапазона измерений: металлический болометр (обзорный) + линейка пироэлектрических приемников излучения; пироэлектрический приемник излучения (обзорный) + линейка AXUV-диодов. Особенностью AXUV-диодов является их нечувствительность к нейтралам, таким образом, в комбинации с обзорным детектором другого принципа действия достигается независимость от природы излучения. Кроме того, благодаря особенностям AXUV-диодов, становятся возможными исследования вклада нейтралов в общий энергобаланс шнура. Количество каналов 32 и более. Для реализации ПСД предлагается использовать ММС с системной магистралью PCI в промышленном исполнении. Структура измерительных каналов и комплекса технических средств показана на рис. 8.2.9.1.



Рис. 8.2.9.1. Структурная схема ПСД многоканальной болометрии

Для измерения электрического сопротивления болометра, величина которого представляет собой информативный параметр, чаще всего используют мостовые схемы переменного тока. Для достижения высокой точности измерений с помощью мостовой схемы необходимо использовать прецизионные сопротивления в плечах моста. В работе [12] предложено решение, позволяющее уйти от использования прецизионных сопротивлений, а также снизить влияние температуры окружающей среды и фонового излучения. Авторы предлагают помещать в одном болометрическом элементе два разделенных изоляционным слоем идентичных термосопротивления. Два таких болометрических элемента, подключенных соответствующим образом, образуют электрический мост. При этом один из элементов является измерительным, другой – опорным. Несколько таких болометрических элементов располагаются на одной изолирующей пленке и составляют болометрическую линейку. Такой подход обеспечивает близость параметров элементов болометрического моста и позволяет значительно уменьшить размеры болометрического модуля. Конструктивно болометрическая линейка выполняется в виде двух алюминиевых охлаждающих пластин, между которыми зажимается изолирующий слой с болометрическими элементами. В передней охлаждающей пластине напротив измерительных элементов сделаны отверстия, через которые на поглощающие элементы падает излучение плазмы (эти отверстия также играют роль коллиматоров), напротив опорных элементов сделаны углубления, так что толщина алюминия составляет 0,6 мм. Такой слой задерживает нейтралы и мягкое рентгеновское излучение плазмы, но пропускает нейтроны и гамма-излучение, что позволяет компенсировать основную часть фонового сигнала, обусловленную ядерным излучением.

Для обеспечения необходимой точности измерений в основу электрической части измерительных каналов подсистемы диагностики радиационных потерь при использовании в качестве детекторов радиационных потерь болометров должен быть положен принцип болометрического моста переменного тока с синхронной демодуляцией и фильтрацией предварительно усиленного выходного сигнала моста. При этом один генератор может использоваться для питания нескольких мостов. Частота питающего напряжения определяется частотным спектром измеряемого сигнала и постоянной времени используемого болометра и находится в рассматриваемом случае в диапазоне 50–200 кГц. После синхронной демодуляции сигнал должен пропускаться через фильтр нижних частот, который подавляет несущую частоту и ее гармоники и выделяет требуемый информационный сигнал.

Для измерительных каналов пироэлектрических приемников излучения и AXUV-диодов необходимо предусмотреть предварительные усилители в непосредственной близости к датчикам, что обусловлено достаточно низкоуровневыми сигналами с них. В целях контроля работоспособности датчиков требуется обеспечить возможность их «засветки» каким-либо источником излучения, например светодиодами. С целью повышения помехозащищенности измерительных каналов может быть использован принцип модуляции-демодуляции.

8.2.10. Подсистема сбора данных корпускулярного анализатора

В состав диагностики «контактная термометрия» входит компактный корпускулярный анализатор CNPA, вакуумные тракты для подсоединения к фланцу вакуумной камеры и турбомолекулярному насосу, а также блок предусилителей, кабельные линии передачи измерительных сигналов с предусилителей, кабельные линии для питания корпускулярного анализатора и блока предусилителей. Структура измерительных каналов и комплекса технических средств показана на рис. КТМ.03.001.050.ТП.

В состав ПСД входит БИПР. Высоковольтные ИП корпускулярного анализатора размещаются в одной стойке с БИПР, но не входят в состав ПСД.

Требования к ИП и кабельным линиям связи приведены в табл. 8.2.10.1, 8.2.10.2.

Таблица 8.2.10.1

Требования к источникам питания

Источник питания	Кол-во источников	Полярность	Напряжение	Максимальный ток	Стабильность
Ускоряющее напряжение	1	+	0–10 кВ	200 мкА	10 ⁻³
Напряжение питания детекторов	1	–	3 кВ	2,5 мА (на все детекторы)	10 ⁻³
Напряжение на отклоняющий конденсатор	1	биполярное	0–10 кВ	200 мкА (каждый канал)	10 ⁻³
Источник тока для датчика Холла	1	любая	2 В	100 мА	10 ⁻³

Требования к кабельным соединениям

Назначение кабеля	Кол-во кабелей	Тип кабеля	Тип разъема на анализаторе	Максимальное напряжение	Максимальный ток	Максимальная длина
Ускоряющее напряжение	1	коаксиал	15381-01-W SHV-Grounded Shield CERAMASEAL-10 kV (air plug 8058-02)	10 кВ	200 мкА	100 м
Напряжение питания детекторов	1	коаксиал	8030-02-W SHV-Grounded Shield CERAMASEAL-5 kV (air plug 8058-01)	3 кВ	2,5 мА	100 м
Напряжение на отклоняющий конденсатор	2	коаксиал	15381-01-W SHV-Grounded Shield CERAMASEAL-10 kV (air plug 8058-02)	10 кВ	200 мкА	100 м
			15381-01-W SHV-Grounded Shield CERAMASEAL-10 kV (air plug 8058-02)			

8.2.11. Подсистема сбора данных многоканального интерферометра

Кардинальный пересмотр предыдущих проектных решений разработчиками диагностики «Многоканальный интерферометр» и отсутствие информации о новых проектных решениях не позволяют однозначно определить требования к ПСД указанной диагностики и приступить к ее проектированию.

Несмотря на это, исходя из имеющегося опыта проектирования аналогичных систем, предварительно предлагаем техническое решение, показанное на чертежах КТМ.03.001.042.ТП и КТМ.03.001.020.ТП.

8.2.12. Подсистема сбора данных интерферометра X-точки

Отсутствие необходимых исходных данных о диагностике «Интерферометрия X-точки» не позволяет приступить к проектированию ПСД рассматриваемой диагностики.

Несмотря на это, на основании анализа принципов построения аналогичных систем предварительно предложено техническое решение по созданию ПСД, показанное на чертежах КТМ.03.001.043.ТП и КТМ.03.001.020.ТП.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Байструков К.И., Цхе А.В. Архитектура подсистемы обработки, хранения и выдачи экспериментальных данных установки токамака КТМ // Мат-лы VII Всерос. науч. конф. студентов-физиков и молодых ученых ВНКСФ-7. – Екатеринбург-СПб., 2001. – С. 786–788.
2. Вознесенский В.А., Семенов И.Б. Международная система управления и сбора данных (SCADA) MDSplus и возможности ее использования на российских токамаках. – Препринт ИАЭ-6249/14, 2002. – 68 с.
3. Документация на систему MDSplus: [//www.mdsplus.org](http://www.mdsplus.org).
4. Драпико Е.А., Байструков К.И., Ясельский В.К. Построение подсистемы диагностики профиля радиационных потерь токамака КТМ // Тезисы докладов VII Междунар. конф. «Инженерные проблемы термоядерных реакторов ИПТР-7». – СПб.: ФГУП НИИЭФА им. Д.В. Ефремова, 2002. – С. 170–171.
5. Дудина О.А., Клыковская Т.С., Ушакова М.Н. и др. Программно-аппаратные средства сбора измерительной информации и архив экспериментальных данных // Автоматизация экспериментальных исследований на энергофизических установках: сб. ст. – Ташкент, 1991. – С. 84.
6. Изменения к техническому проекту токамака КТМ. – НТЦ «Синтез», ГП НИИЭФА, 2003.
7. Код EFIT в Internet: <http://lithos.gat.com/efit>.
8. Код Transp в Internet: <http://w3.pppl.gov/transp>.
9. Команды и конструкции TDI на сайте PPPL: http://nstx.pppl.gov/nstx/Software/TDI/TDI_INDEX.HTML.
10. Команды языка TCL на сайте PPPL: http://nstx.pppl.gov/nstx/Software/TCL_index.html.
11. Описание интерфейса к библиотеке MDSLlib для языков Си и Фортран: <http://www.mdsplus.org/mdslib/mdslib.html>.
12. План компоновки физических диагностик материаловедческого токамака КТМ. ДГП ИАЭ ДГП НЯЦ РК, 2003.
13. Потемкин В. Система инженерных и научных расчетов MATLAB 5.x. – М.: Диалог МИФИ, 1999.
14. Сайт разработчика языка IDL: <http://www.rsinc.com>
15. Семенов И.Б., Вознесенский В.А. К вопросу создания российской FUSION GRID // Мат-лы конф. «Диагностика высокотемпературной плазмы-10». – Троицк, 2003.
16. Шарнин А.В., Рогозный Д.В., Востриков А.В. Подсистема сбора данных и управления многочастотного импульсного радар-рефлектометра токамака КТМ // Тезисы докладов VII Междунар. конф. «Инженерные проблемы термоядерных реакторов ИПТР-7». – СПб.: ФГУП НИИЭФА им. Д.В. Ефремова, 2002. – С. 201–202.

17. Ясельский В.К., Байструков К.И., Павлов В.М. и др. Система автоматизации экспериментов термоядерной материаловедческой установки КТМ // Известия ВУЗов. Физика. – 2000. – № 4. – С. 53–61.
18. Ясельский В.К., Павлов В.М., Холоша А.Ю. и др. Использование системы TRACE MODE при автоматизации исследований на термоядерной установке КТМ // Приборы и системы. Управление, Контроль, Диагностика. – 2002. – № 1. – С. 33–38.
19. Ясельский В.К., Шарнин А.В., 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. – 203 с.
20. Balch T.R., Renbarger V.L. et al. A user interface of networked workstations for MFTF-B plasma diagnostic instruments // 11th Symp. Fusion Eng. Proc., Austin, Tex., Nov 18–22, 1985, Vol. 1. – N.Y., 1986. – P. 613–618.
21. Balme S., Breton J. et al. The TORE SUPRA data acquisition system // Fusion Technol. – Amsterdam etc, 1989. – P. 1680–1686.
22. Beken H. van der Computer control and data acquisition at Jet // IEEE Trans. Nucl. Sci, 1987. – № 4. – P. 742–746.
23. Bell J.D. et al. Upgrade of MHD data acquisition system from ISX-B to ATF // IEEE Trans. Nucl. Sci. – 1987. – № 4. – P. 768–771.
24. Broesch J.D., Phillips J.C. at al. A Handheld, Free Roaming, Data Display for DIII-D // Diagnostic Data in the Proc. of the 11th IEEE/NPSS Real-Time Conf., Santa Fe, New Mexico. – P. 811.
25. Bruhns H., Cha S., Heimann P. et al. The control system for ASDEX Upgrade // Proceedings of 15th Symposium on Fusion Technology, Utrecht, 1988. – P. 1653–1657.
26. Buceti G. Data acquisition system and database for tokamak experiments the FTU case // IEEE Conf. Real Time Comput. Appl. Nucl. Part and Plasma Phys, East. Lansing, Mich, May 24–25 1995. – P. 160–163.
27. Burrell K.H. Diagnostics for advanced tokamak research // Rev. Sci. Instrum (72). – 2001. – № 1.
28. Buther D.N. The MTX data acquisition system // IEEE 13th Symp. Fusion. Eng., Knoxwill. – P. 164–166.
29. Chervyatkin M.V., Yaselskij V.K., Bajstrukov K.I. Strain-gauge system of tokamak KTM technological diagnostics // The VI international Scientific and Practical Conference of Students, Post-Graduates and Yong Scientist «Modern Techniques and Technology» (MTT 2000). – Tomsk, 2000. – P. 32–35.
30. Drapiko E.A., Yaselskij V.K., Bajstrukov K.I. Diagnostic subsystem of KTM tokamak radiation losses // The VI international Scientific and Practical Conference of Students, Post-Graduates and Yong Scientist «Modern Techniques and Technology» (MTT 2000). – Tomsk, 2000. – P. 30–32.
31. Fredian T.W. Data acquisition system for Alcator C-Mod // Rev. Sci. Instr., 1997. – № 1. – Pt. 2. – P. 935–938.

32. Fredian T.W., Stillerman J.A. MDSplus Remote Collaboration Support – Internet and World Wide Web // Fusion Engineering and Design. – Vol. 43. – 1999. – P. 327–334.
33. Fredian T.W., Stillerman J.A., Greenwald M. Data Acquisition System for Alcator C-Mod // 11th Topical Conference. – Monterey, CA, 1996.
34. Grayspoor Reza et al. Development of an integrated data acquisition and handling system based on digital time series analysis for the measurement of plasma fluctuations // 11th Symp. Fusion Eng. Proc., Austin, Tex., Nov., 18–22, 1985, Vol. 2. – N.Y., 1986. – P. 1178–1181.
35. Haren van, P.C., Wijnoltz F. TRAMP, the next generation data acquisition system for RTP // IEEE Trans. Nucl. Sci, 1992, Vol. 39, Issue 2. – P. 95–102.
36. Hidekuma S. Data acquisition and analysis system // Annu. Rept. Nat. Inst. Fusion Sci., May 1989 – March 1990. – Nagoya, 1990. – P. 120.
37. Hidekuma S. LHD data acquisition and analysis system for LHD diagnostics // Annu. Rept. Nat. Inst. Fusion Sci., May 1989 – March 1990. – Nagoya, 1990. – P. 54.
38. Hidekuma S. Data acquisition and control system for LHD diagnostics // Annu. Rept. Nat. Inst. Fusion Sci., 1993. – P. 71.
39. Hidekuma S., Ida K. Data acquisition and analysis system for the JIPP T-IIU // Annu. Rev., Apr 1988-May 1989 / Inst. Plasma Phys. Nagoya Univ. – Nagoya, 1990. – P. 59.
40. Jotaki Eriko, Ito Satoshi. A data acquisition method against unpredictable events during long time discharges and its application to the TRIAM-1M tokamak experiment. – Fusion Technol, 1997. – № 3. – P. 487–492.
41. Laisen J.M. and oth. The data acquisition system of the tokamak de Varennes // Fusion Technol., 1988: Proc. 15th Symp. Utrecht, 19–23 Sept., 1988, Vol. 2. – Amsterdam etc., 1989. – P. 1687–1691.
42. Lau Norman H.C. and oth. Results of studies of fiber optic links for MFTF // Proc. 8th Symp. Eng. Probl. Vol. 1. – N.Y., 1981. – P. 981–984.
43. LZO – a real-time data compression library.
<http://www.oberhumer.com/opensource/lzo/>
44. McHarg B.B., Buruss J.R. et al. DIII-D Data Management // Fusion Eng. and Design 60, 305 (2002) Meeting: 3rd IAEA Technical Committee Meeting on Control, Data Acquisition and Remote Participation for Fusion Research. – Padova, Italy, 2001.
45. Muchovatov V.S. ITER operation and diagnostics // Rev. Sci. Instrum. – 1990. – № 10. – Pt. 2. – P. 3241–3246.
46. Muchovatov V.S. ITER operation and diagnostics // Plasma Phys. and Contr. Nucl. Fusion Res., 1990: Proc. 13th Int. Conf., Washington, D.C., 1–6 Oct., 1990. – Vol 3, Vienna, 1991. – P. 427–433.
47. NSTX Fusion Analysis Software: <http://nstx.pppl.gov/nstx/Software/fas>.
48. Penaflo B.G., McHarg B.B. Software Development on the DIII-D Control and Data Acquisition Computers // Proc. of the 17th IEEE/NPSS Symp. on Fusion Engineering, 1997. – Vol. 2. – P. 811–814.

49. Schissel D.P., Peng Q., McHarg B.B., JR., etc. Recent enhancements to analyzed data acquisition and remote participation at the DIII-D National Fusion Facility, 2000. – GA-A23471.
50. Sharnin A.V., Bajstrukov K.I. Reflectometer data acquisition subsystem of the thermonuclear installation KTM // The VI international Scientific and Practical Conference of Students, Post-Graduates and Young Scientist «Modern Techniques and Technology» (MTT 2000). – Tomsk, 2000. – P. 27–29.
51. Shu Yan-tai, Liu Gen-chang et al. Data acquisition and processing system for the HT-6M tokamak fusion experiment // IEEE Trans. Nucl. Sci. – 1987. – № 4. – P. 782–785.
52. Stillerman J.A., Fredian T.W. MDSplus data acquisition system // Review of Scientific Instruments. – 1997. – № 68(1). – P. 939–942.
53. Stillerman J., Fredian Th. The MDSplus data acquisition system, current status and future directions // Fusion Engineering and Design. – Vol. 43. – 1999. – P. 301–308.
54. Takahashi S. Development of CAMAC device driver for data acquisition system of CHS // Annu. Rept. Nat. Inst. Fusion Sci., 1993. – P. 164.
55. Takahashi C., Okamura S. Data acquisition and analysis system for CHS project // Annu. Rev., Apr 1988 – May 1989 / Inst. Plasma Phys. – Nagoya Univ., Nagoya, 1990. – P. 20.
56. Takahashi C. et al. CHS data acquisition and analysis system and synchronized network computing // Annu. Rept. Nat. Inst. Fusion Sci., 1996. – P. 247.
57. Vega J. Software architecture of data acquisition control process during TJ-11 operation // Rev. Sci. Instr., Vol. 68, № 1, Pt. II, January, 1997. – P. 959.
58. Vega J., Mollinedo A. Integration of autonomous system for remote control of data acquisition and diagnostics in the TJ-II device // Rev. Sci. Instr. – 1997. – № 1, Pt. 2. – P. 963–966.
59. Zoletnik S., Kalvin S. PC network based data acquisition system for the MT-1M tokamak // Rev. Sci. Instrum. – 1991. – № 6. – P. 1517–1520.

**ЧЕРТЕЖИ И СХЕМЫ
ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ
СИСТЕМЫ**

1. КТМ.03.001.001.ТП. Таблица параметров диагностической аппаратуры
2. КТМ.03.001.002.ТП. Исходные данные. Схема размещения диагностического комплекса КТМ
3. КТМ.03.001.003.ТП. Структурная схема ИИС
4. КТМ.03.001.004.ТП. Схема информационных потоков ИИС КТМ
5. КТМ.03.001.005.ТП. Функциональная диаграмма САЭ КТМ
6. КТМ.03.001.006.ТП. Схема информационных потоков САЭ КТМ
7. КТМ.03.001.007.ТП. Структура технических средств ИИС
8. КТМ.03.001.008.ТП. Схема размещения пультов ИИС
9. КТМ.03.001.009.ТП. Чертеж общего вида стойки серверов САЭ КТМ
10. КТМ.03.001.010.ТП. Видеограмма пульта ведущего физика
11. КТМ.03.001.011.ТП. Блок-схема алгоритма работы ИИС
12. КТМ.03.001.012.ТП. Блок-схема алгоритма работы блока измерения и первичной регистрации
13. КТМ.03.001.013.ТП. Блок-схема алгоритма сбора и регистрации данных на интервале между разрядами
14. КТМ.03.001.014.ТП. Структурная схема системы послеэкспериментальной обработки информации токамака КТМ
15. КТМ.03.001.015.ТП. Структура программного обеспечения уровня II ИИС
16. КТМ.03.001.016.ТП. Архитектура программного обеспечения III и IV уровней ИИС
17. КТМ.03.001.017.ТП. Схема взаимодействия программных компонент
18. КТМ.03.001.018.ТП. Структурная схема доступа к БДРИ с рабочей станции ИИС
19. КТМ.03.001.019.ТП. Схема размещения БИПР
20. КТМ.03.001.020.ТП. Схема размещения БИПР ОИ, ДТМ_1, X-интерферометра
21. КТМ.03.001.021.ТП. Схема размещения БИПР ЭМД_2, На-Да, МГД, V.cam
22. КТМ.03.001.022.ТП. Схема размещения БИПР ДПРП, ДЖРИ, ДКТ_1
23. КТМ.03.001.023.ТП. Схема размещения БИПР РТС, СП.обз., ДКТ_2

					Ведомость чертежей	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		1

24. КТМ.03.001.024.ТП. Схема размещения БИПР IR.cam, ДТМ_2, V.cam, Корп
25. КТМ.03.001.025.ТП. Схема размещения БИПР ЭМД_1, МИРР, ДТМ_3, ДКТ_3
26. КТМ.03.001.026.ТП. Схема размещения БИПР ДМРИ, АОГ, ДВЧ-генератора
27. КТМ.03.001.027.ТП. Структурная схема БИПР ПСД ЭМД
28. КТМ.03.001.028.ТП. Структурная схема БИПР ПСД ДКТ
29. КТМ.03.001.029.ТП. Структурная схема БИПР ПСД ДТМ
30. КТМ.03.001.030.ТП. Структурная схема БИПР ПСД АОГ
31. КТМ.03.001.031.ТП. Структурная схема БИПР ПСД ОИ
32. КТМ.03.001.032.ТП. Структурная схема БИПР ПСД МИРР
33. КТМ.03.001.033.ТП. Структурная схема БИПР ПСД На-Да и монитора ВУФ
34. КТМ.03.001.034.ТП. Структурная схема БИПР ПСД СП.ОБЗ и СП.ВР
35. КТМ.03.001.035.ТП. Структурная схема БИПР ПСД высокоскоростных ИК-камер и видеокамер наблюдения дивертора
36. КТМ.03.001.036.ТП. Структурная схема БИПР ПСД дополнительных видеокамер наблюдения критических зон
37. КТМ.03.001.037.ТП. Структурная схема БИПР МГД-диагностики
38. КТМ.03.001.038.ТП. Структурная схема БИПР ПСД ДЖРИ
39. КТМ.03.001.039.ТП. Структурная схема БИПР ПСД РТС
40. КТМ.03.001.040.ТП. Структурная схема БИПР ПСД ДПРП
41. КТМ.03.001.041.ТП. Структурная схема БИПР ПСД корпускулярного анализатора
42. КТМ.03.001.042.ТП. Структурная схема БИПР ПСД ИМ

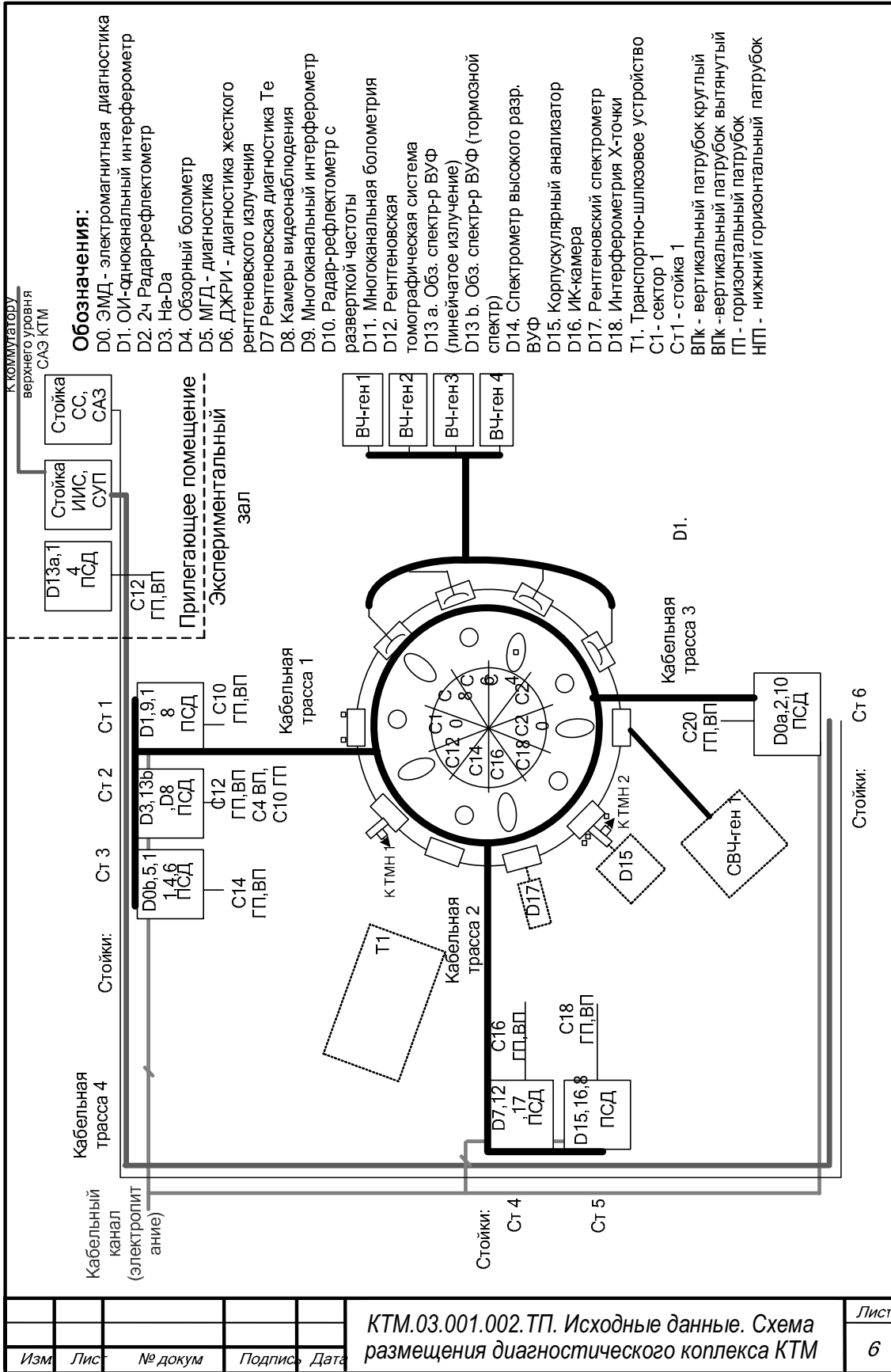
					Ведомость чертежей	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		2

№ п/п	Наименование диагностик	Подключение к патрубкам на камере токамака КТМ	Технические требования к размещению и электропитанию
1	Электромагнитная диагностика (ЭМД)	разъемы для подключения датчиков, размещенных внутри вакуумной камеры токамака КТМ	электропитание необходимо только для системы сбора данных
2	Контактная тензометрия (ДКТ)	разъемы для подключения датчиков, размещенных внутри вакуумной камеры токамака КТМ	размещение на вакуумной камере и элементах конструкции токамака КТМ
3	Контактная термометрия (ДТМ)	разъемы для подключения датчиков, размещенных внутри вакуумной камеры токамака КТМ	размещение на вакуумной камере и элементах конструкции токамака КТМ
4	Анализатор остаточного газа (АОГ)	подключение к вакуумному тракту	датчики включены в состав подсистем управления процессом вакуумно-технологической подготовки
5	Одноканальный интерферометр-рефрактометр (ОИ)	горизонтальный патрубок	в стойке вблизи горизонтального патрубка, место для размещения 400 × 400 × 400 мм; электропитание 220 В, 1 кВт
6	2-частотный импульсный радар-рефлектометр (МИРР)	горизонтальный патрубок – два вакуумных окна Ø 7 см	в стойке вблизи горизонтального патрубка, место для размещения 400 × 400 × 400 мм; электропитание 220 В, 1 кВт
7	Монитор H _α -D _α (H _α -D _α)	1 вертикальный и 1 горизонтальный патрубки	в стойке в экспериментальном зале, место для размещения 500 × 500 × 200 мм; вес системы регистрации 20 кг; электропитание 220 В, 1,5 кВт
8	Обзорный болометр радиационных потерь (ДПРП.обз)	1 вертикальный и 1 горизонтальный патрубки	размещение на патрубке вакуумной камеры 200 × 100 × 100 мм; блок ИП нагревателя – 400 × 400 мм
9	МГД-диагностика (МГД)	разъемы для подключения датчиков, размещенных внутри вакуумной камеры токамака КТМ	электропитание необходимо только для системы сбора данных и подается через разделительный трансформатор или используется ИБП

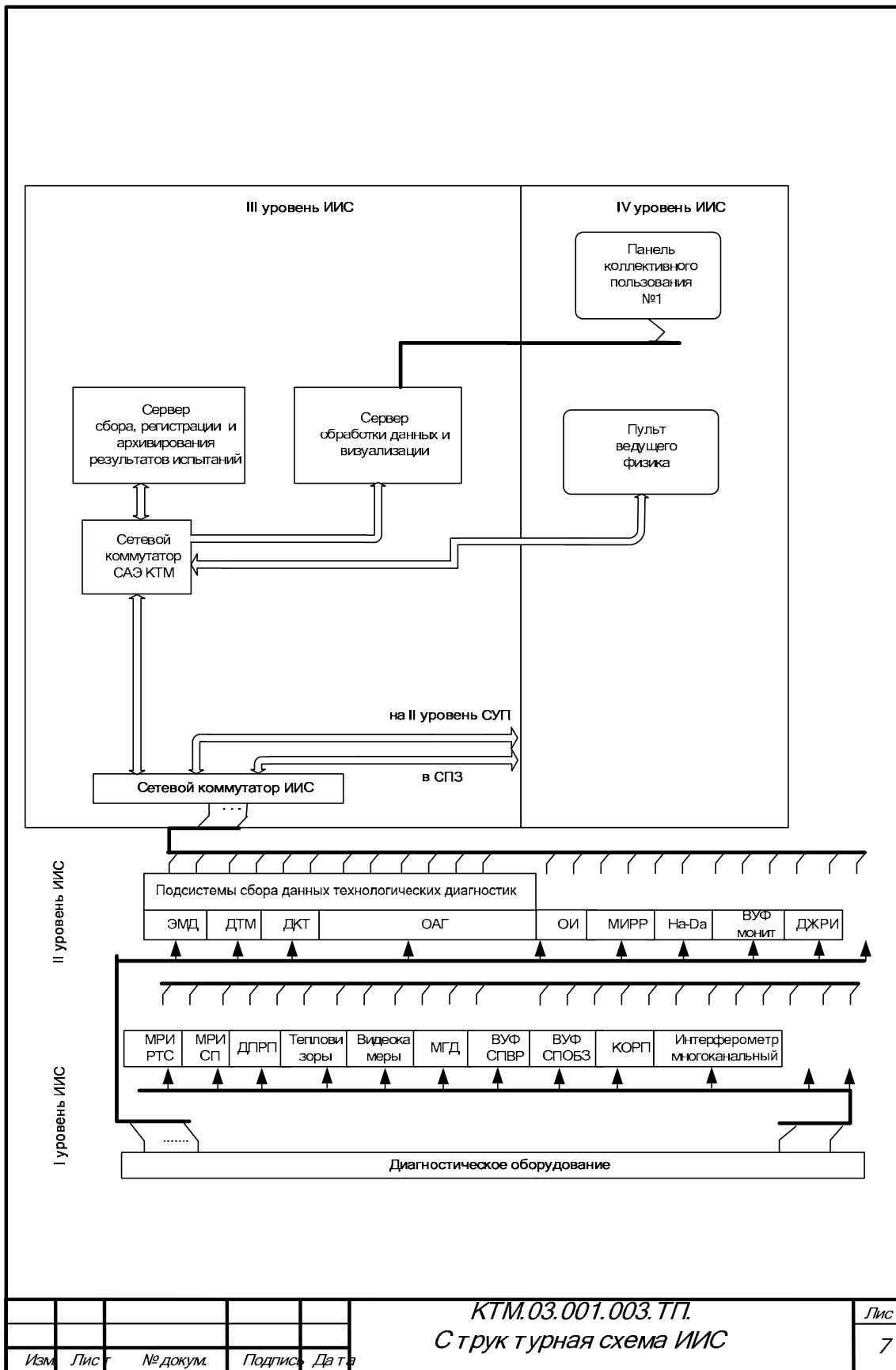
					КТМ.03.001.001.ТП. Таблица параметров диагностической аппаратуры	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Изм.			3

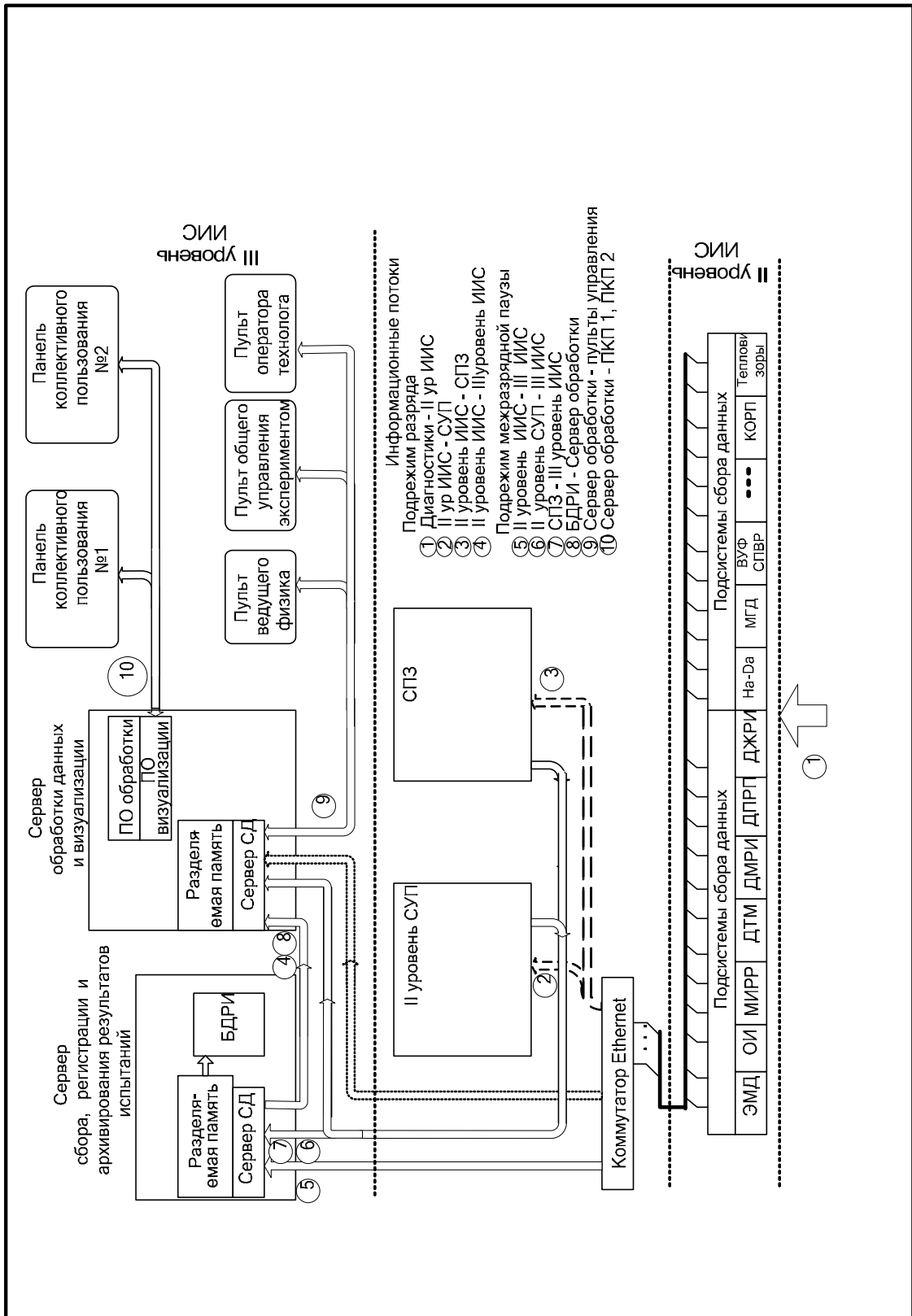
10	Диагностика жесткого рентгеновского излучения (ДЖРИ)	место на патрубках и на вакуумной камере не требуется	размещение в 3–5 м от вакуумной камеры
11	Диагностика мягкого рентгеновского излучения (ДМРИ.обз)	горизонтальный и вертикальный патрубок	размещение на патрубке, габариты 220 × 300 мм; вес 0,3 кг; электропитание ± 20 В, 200 Вт
12	Камеры видеонаблюдения критических зон (V.cam)	вертикальные и горизонтальные патрубки	размещение на патрубке, 220 × 300 мм; вес 0,3 кг; электропитание + 5 В, 20 Вт
13	Многоканальный бесшумный интерферометр (ИМ)	горизонтальный патрубок	в стойке вблизи горизонтального патрубка, электропитание 220 В, 1 кВт
14	Сканирующий импульсный радар-рефлектометр (МИРР-СКАН)	горизонтальный патрубок – размеры вакуумных окон (2–4 окна), Ø 5 см	в стойке вблизи горизонтального патрубка, необходимое пространство 400 × 400 × 400 мм; электропитание 220 В, 1 кВт
15	Диагностика полных радиационных потерь (ДПРП)	1 вертикальный и 1 горизонтальный патрубки	камеры-обскуры (250 × 250 мм) на фланцах патрубков (2 шт.); блок ИП нагревателя – 400 × 400 мм; электропитание + 24 В, 50 Вт
16	Рентгеновская томографическая система (РТС)	1 вертикальный, 1 горизонтальный патрубки в одном сечении	три камеры-обскуры (250 × 250 мм) на трех фланцах патрубков; вес 10 кг; электропитание 220 В, 1 кВт
17	Обзорный спектрометр видимого и УФ-диапазонов излучения (СП.ОБЗ)	1 вертикальный и 1 горизонтальный патрубки	оптические объективы на патрубках, световоды, спектрометр в отдельном помещении вне зала: 10–50 м от установки; габариты спектрометра 300 × 500 × 300 мм; вес 40 кг; электропитание 220 В, 1 кВт

					<i>КТМ.03.001.001.ТП. Таблица параметров диагностической аппаратуры</i>	<i>Лис</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лис</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Изм.</i>			4

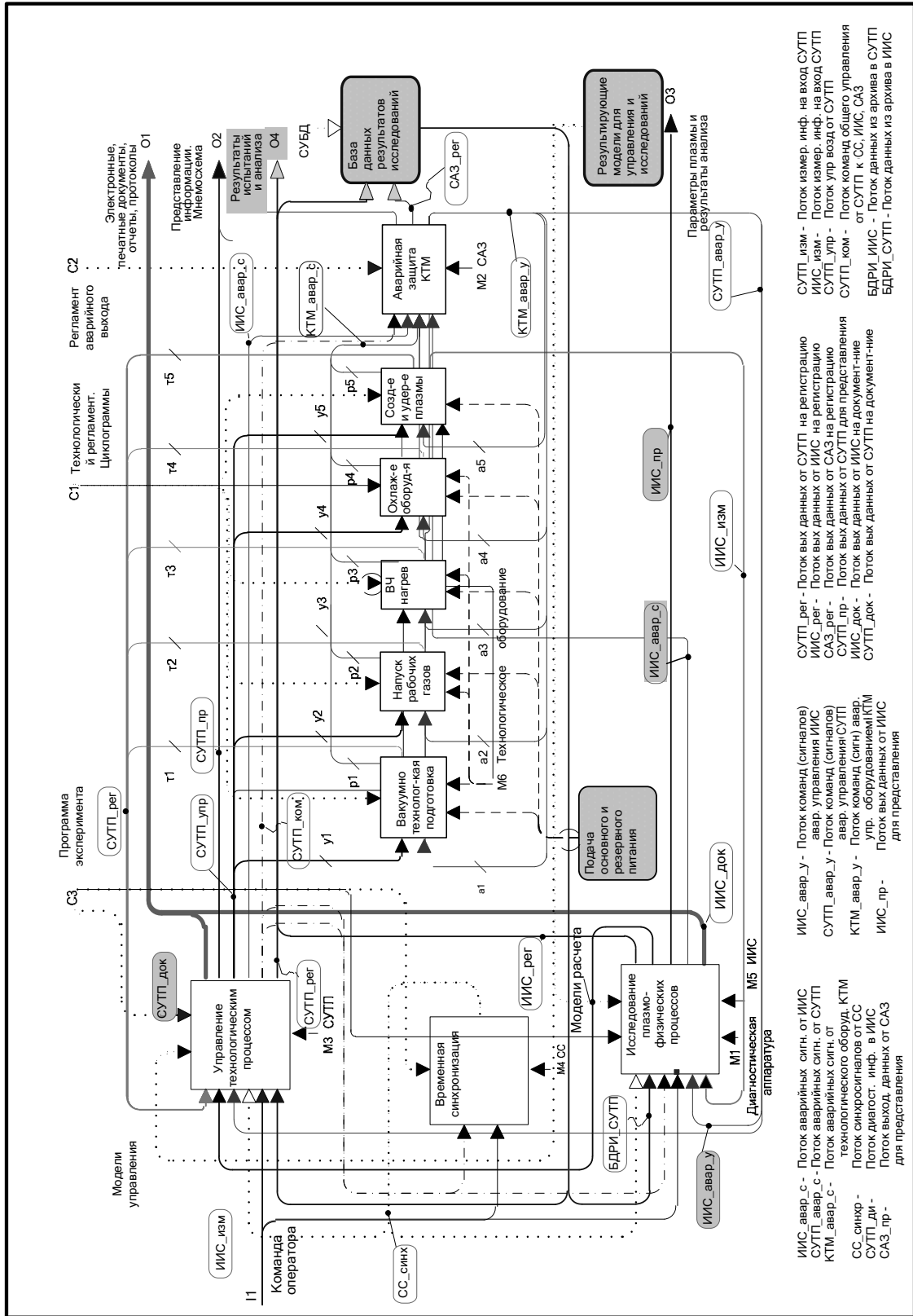


КТМ.03.001.002.ТП. Исходные данные. Схема размещения диагностического комплекса КТМ





Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	КТМ.03.001.004. ТП. Схема информационных потоков ИИС КТМ1.	Лист 8
------	------	----------	---------	------	--	-----------



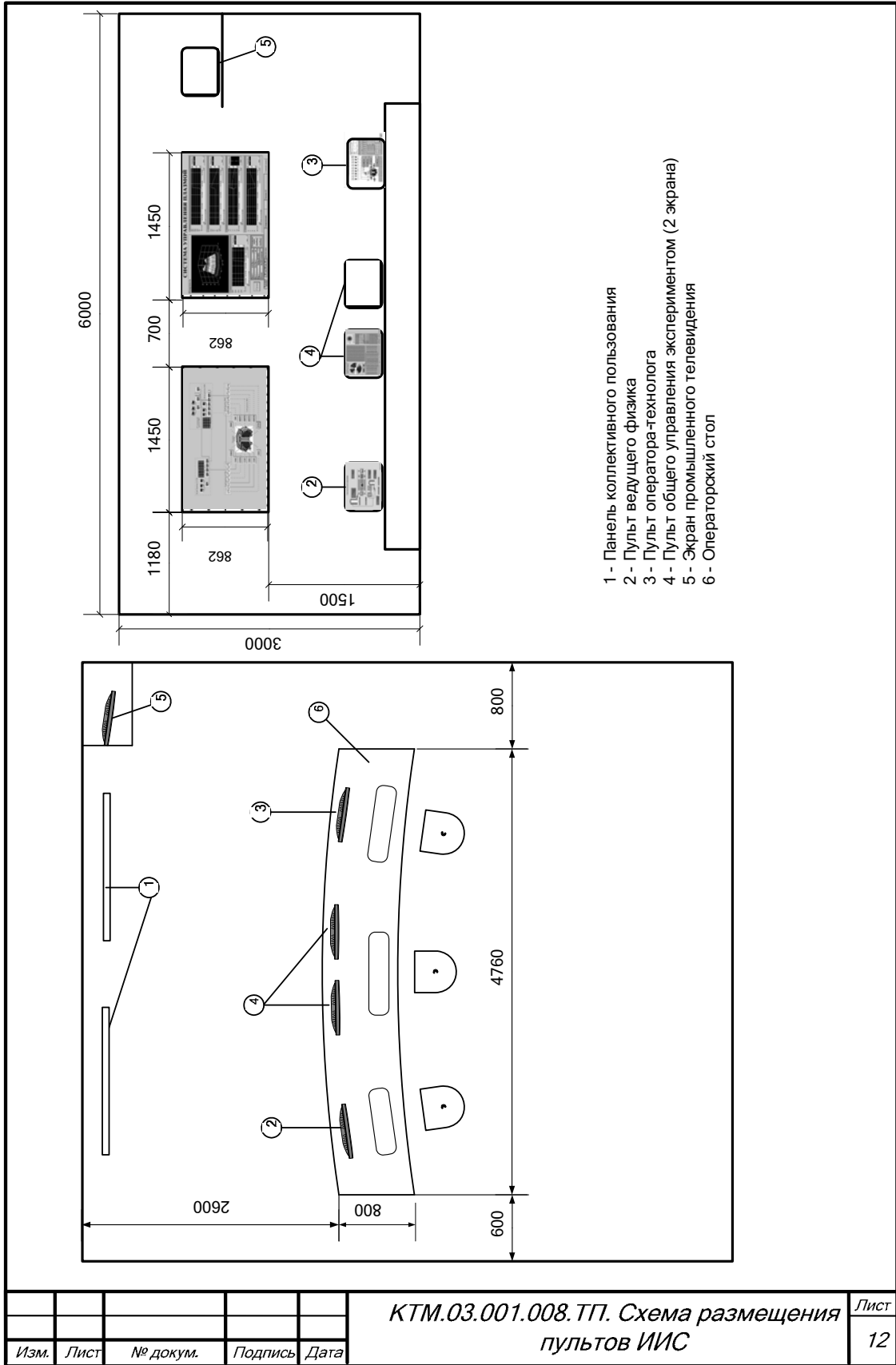
СУТП_изм - Поток измер. инф. на вход СУТП
 ИИС_изм - Поток измер. инф. на вход СУТП
 СУТП_упр - Поток упр. инф. от СУТП
 СУТП_ком - Поток команд общего управления от СУТП к СС, ИИС, САЗ
 БДРИ, ИИС - Поток данных из архива в СУТП
 БДРИ, СУТП - Поток данных из архива в ИИС

СУТП_рег - Поток вых. данных от СУТП на регистрацию ИИС
 ИИС_рег - Поток вых. данных от ИИС на регистрацию САЗ
 САЗ_рег - Поток вых. данных от САЗ на регистрацию СУТП
 СУТП_пр - Поток вых. данных от СУТП для предоставления ИИС
 ИИС_док - Поток вых. данных от ИИС на документ-ние СУТП
 СУТП_док - Поток вых. данных от СУТП на документ-ние ИИС

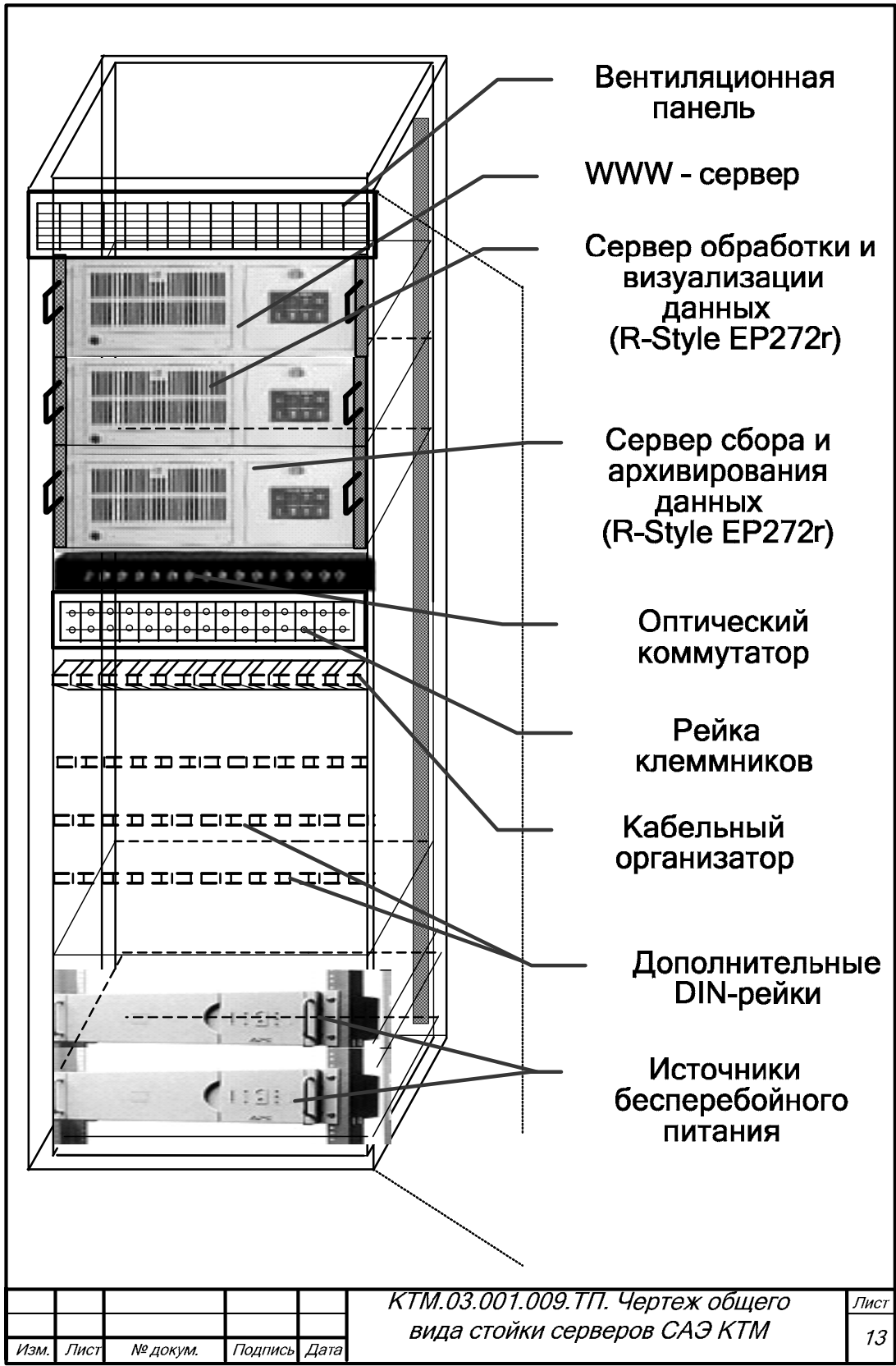
ИИС_авар_у - Поток команд (сигналов) авар. управления ИИС
 СУТП_авар_у - Поток команд (сигналов) авар. управления СУТП
 КТМ_авар_у - Поток команд (сигн) авар. упр. оборудованием КТМ
 ИИС_пр - Поток вых. данных от ИИС для предоставления

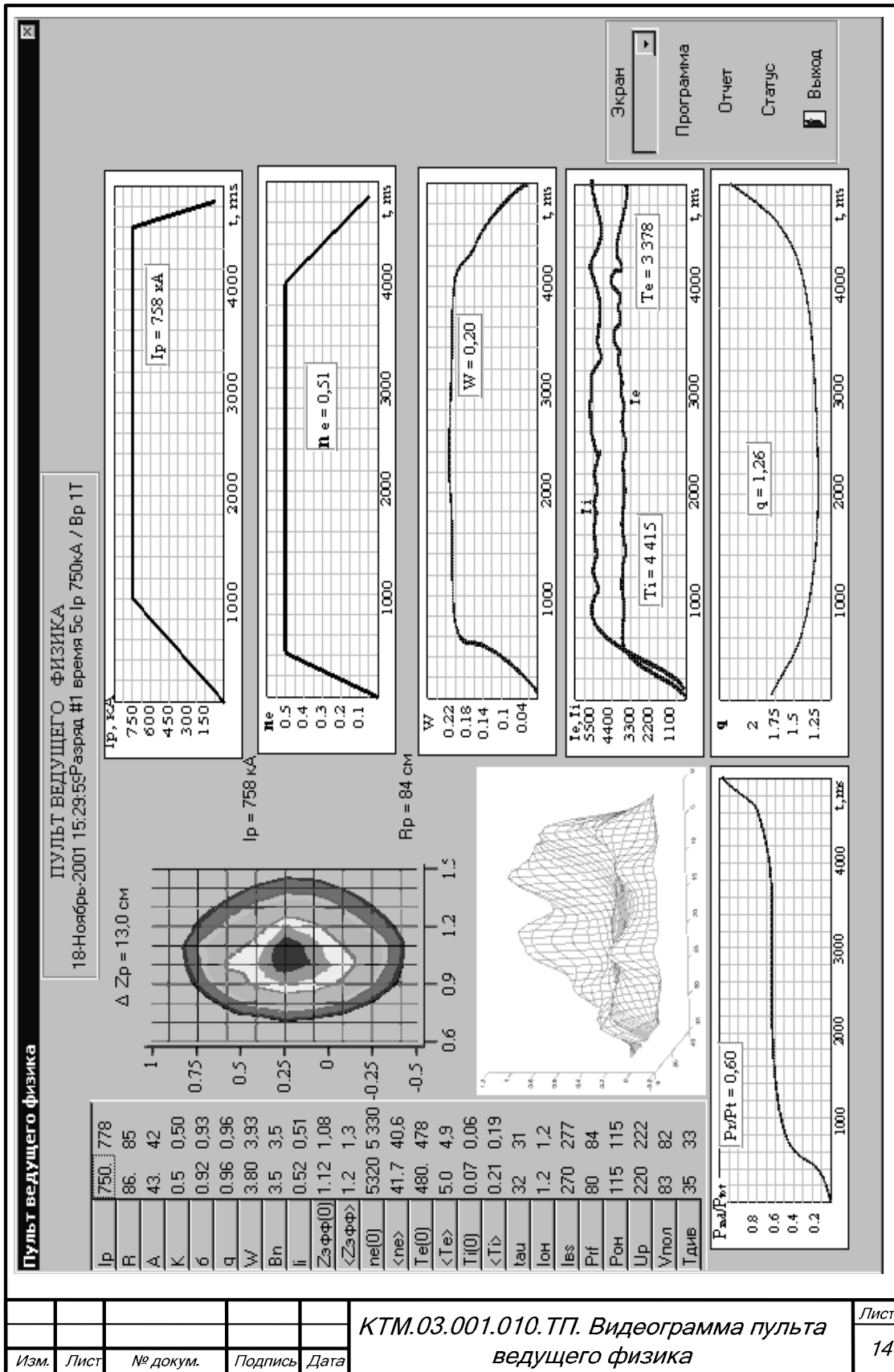
ИИС_авар_с - Поток аварийных сигн. от ИИС
 СУТП_авар_с - Поток аварийных сигн. от СУТП
 КТМ_авар_с - Поток аварийных сигн. от технологического оборуд. КТМ
 СС_синхр - Поток синхронизации от СС
 СУТП_ди - Поток диагност. инф. в ИИС
 САЗ_пр - Поток вых. данных от САЗ для предоставления

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	КТМ.03.001.005.ТП. Функциональная диаграмма САЗ КТМ	Лист
						9



					КТМ.03.001.008.ТП. Схема размещения пультов ИИС	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		12

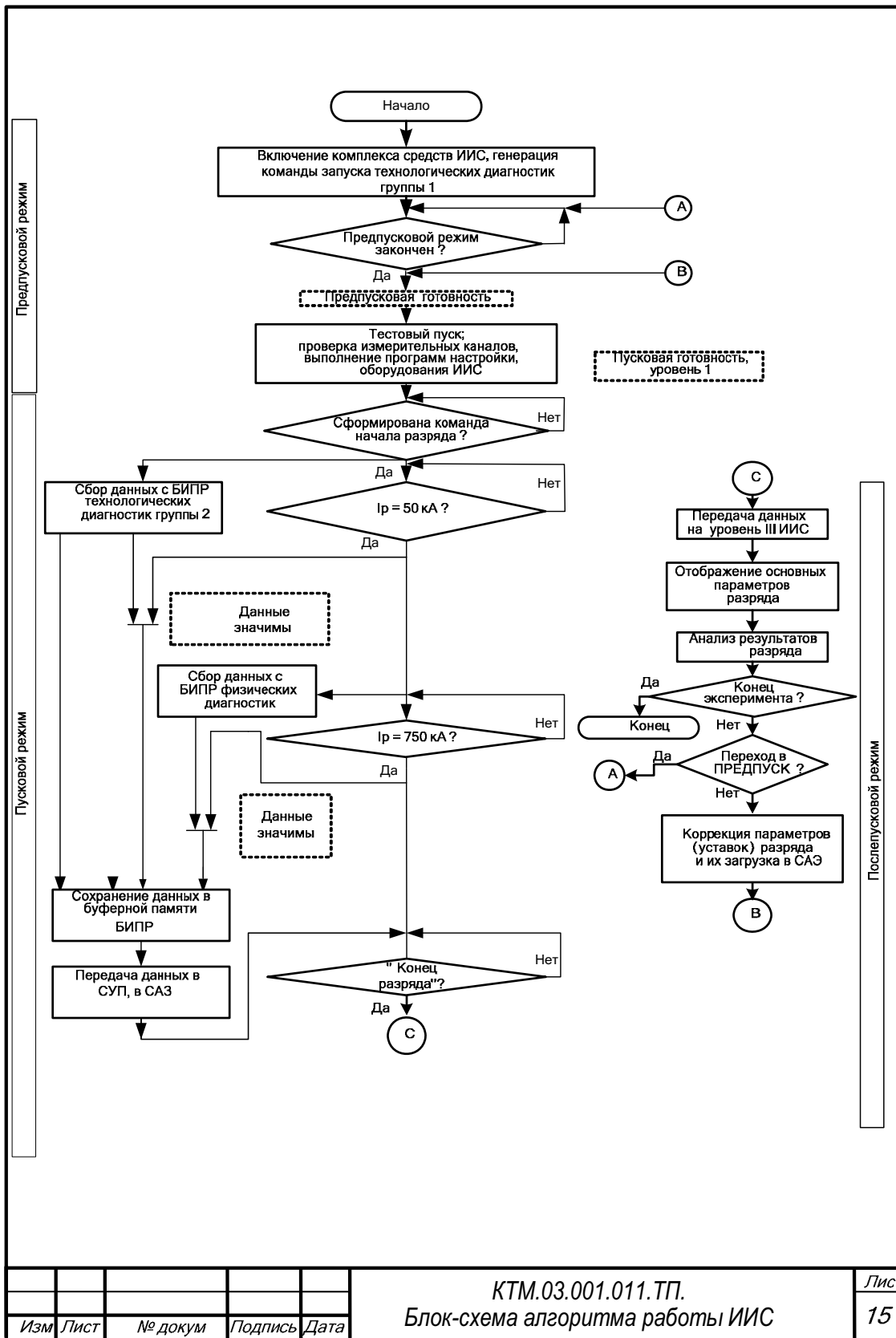




Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата
------	------	----------	---------	------

КТМ.03.001.010.ТП. Видеограмма пульта ведущего физика

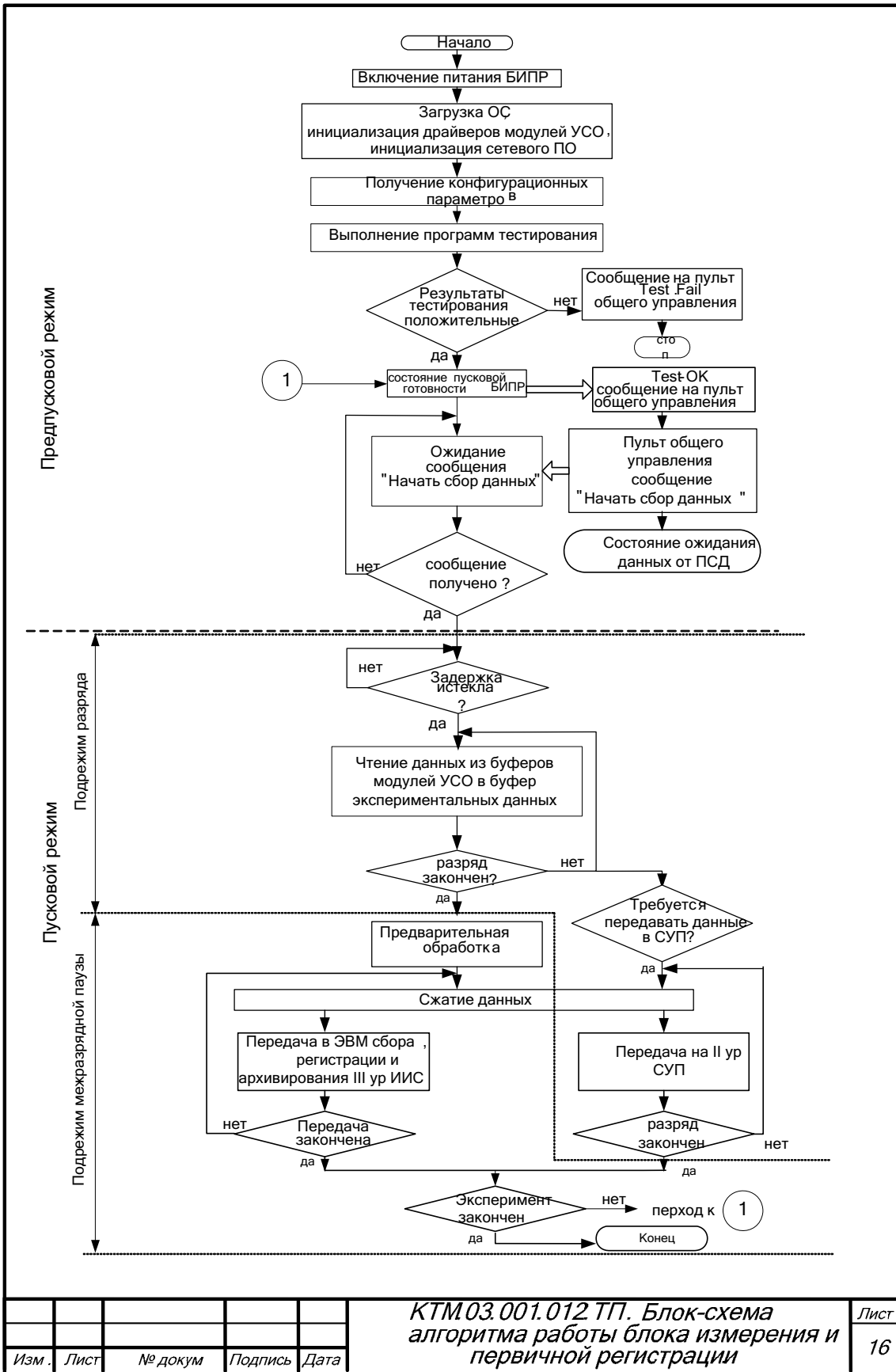
Лист 14



КТМ.03.001.011.ТП.
Блок-схема алгоритма работы ИИС

Лист

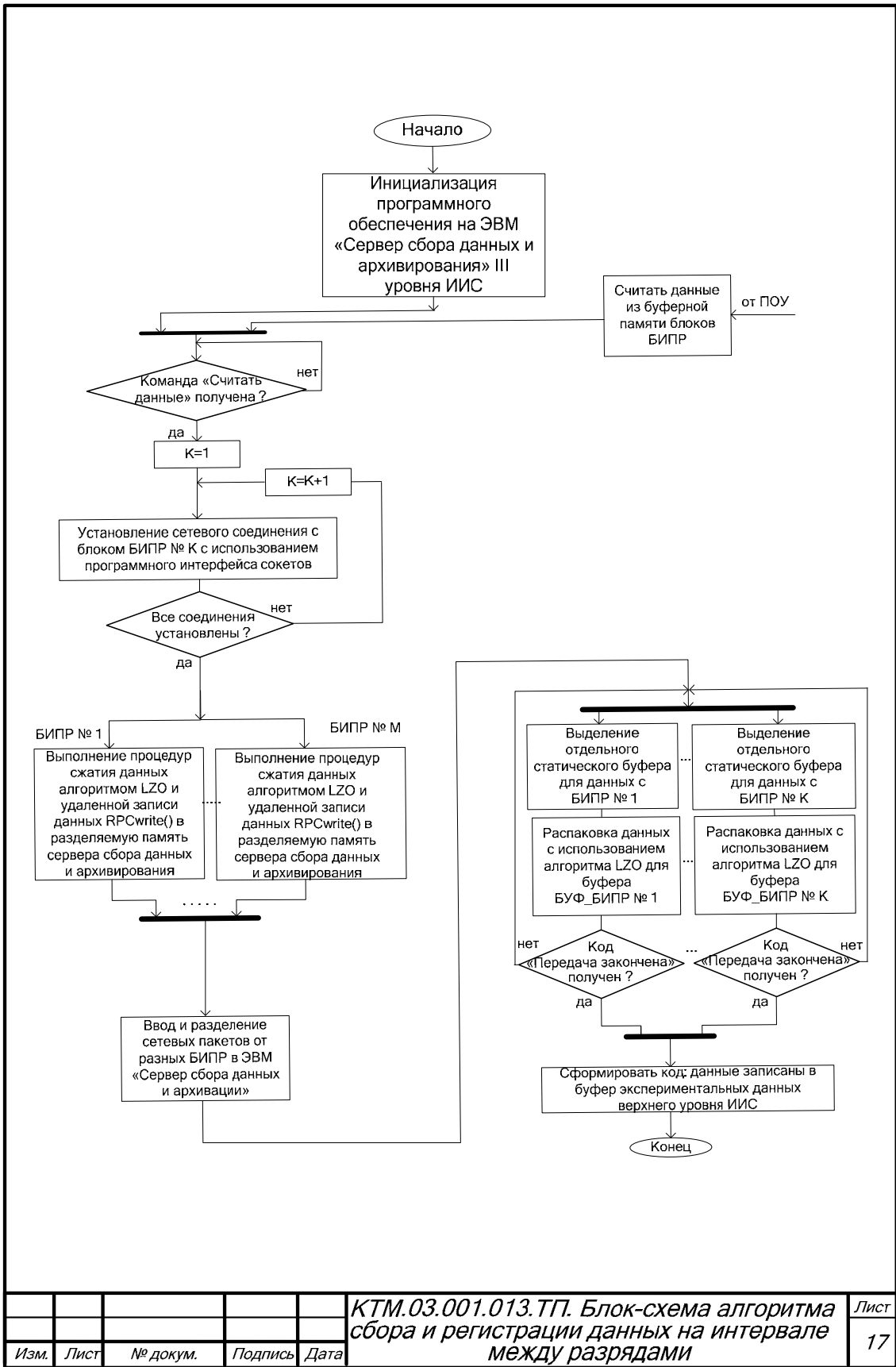
15



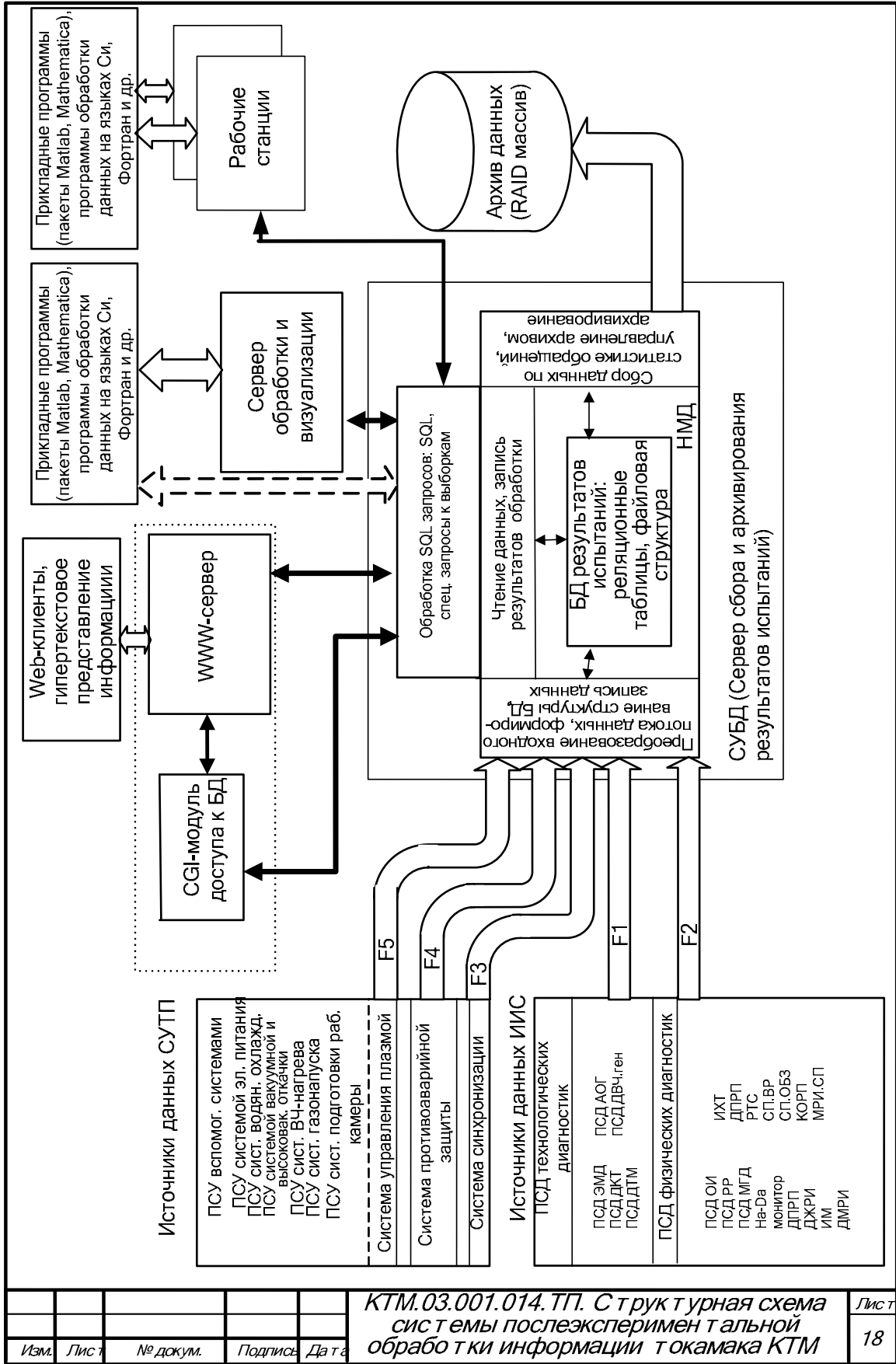
КТМ 03.001.012 ТП. Блок-схема алгоритма работы блока измерения и первичной регистрации

Лист 16

Изм.	Лист	№ докум	Подпись	Дата



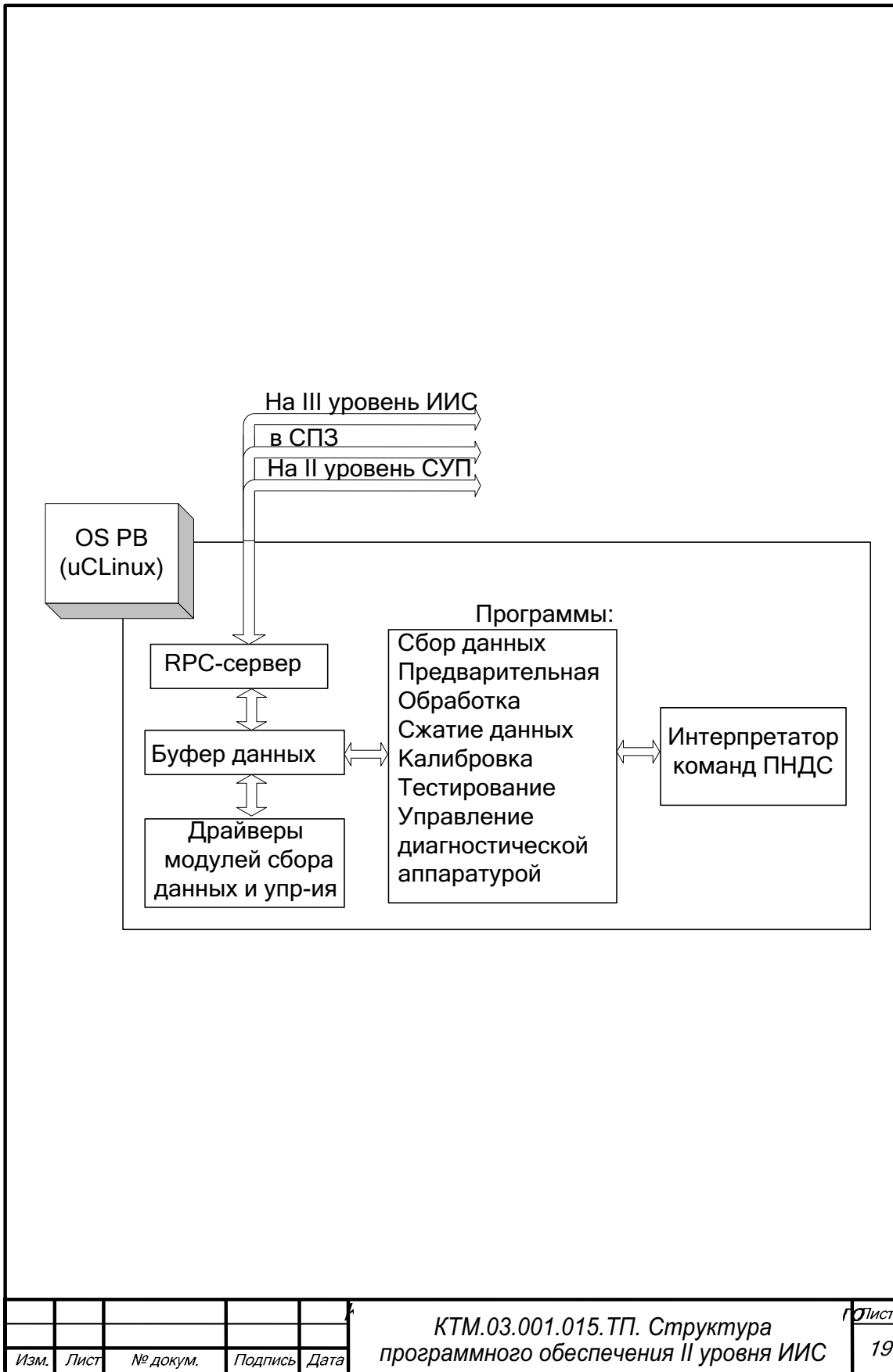
КТМ.03.001.013.ТП. Блок-схема алгоритма сбора и регистрации данных на интервале между разрядами



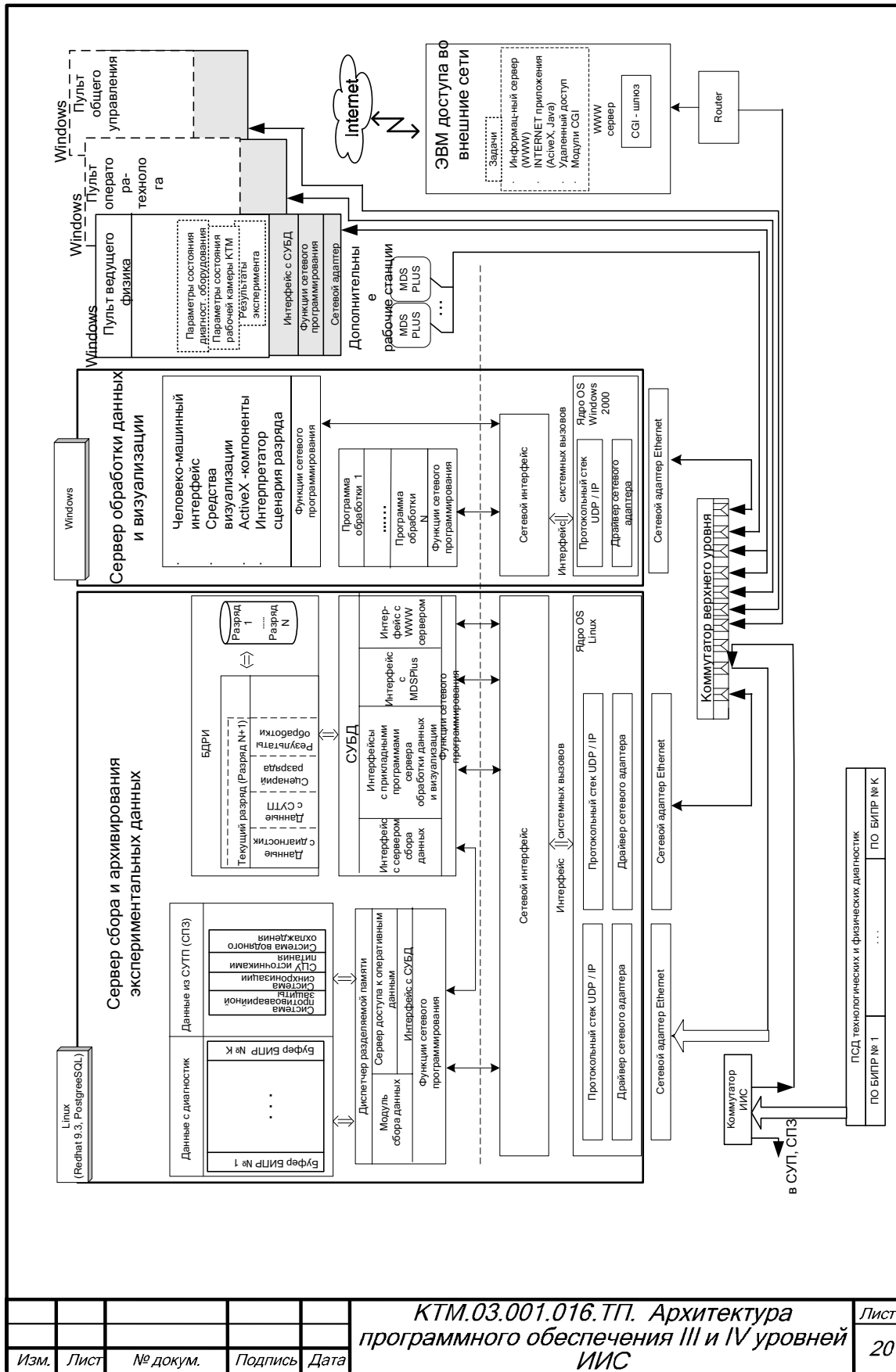
КТМ.03.001.014. ТП. Структурная схема системы послезэкспериментальной обработки информации токамака КТМ

Лист

18



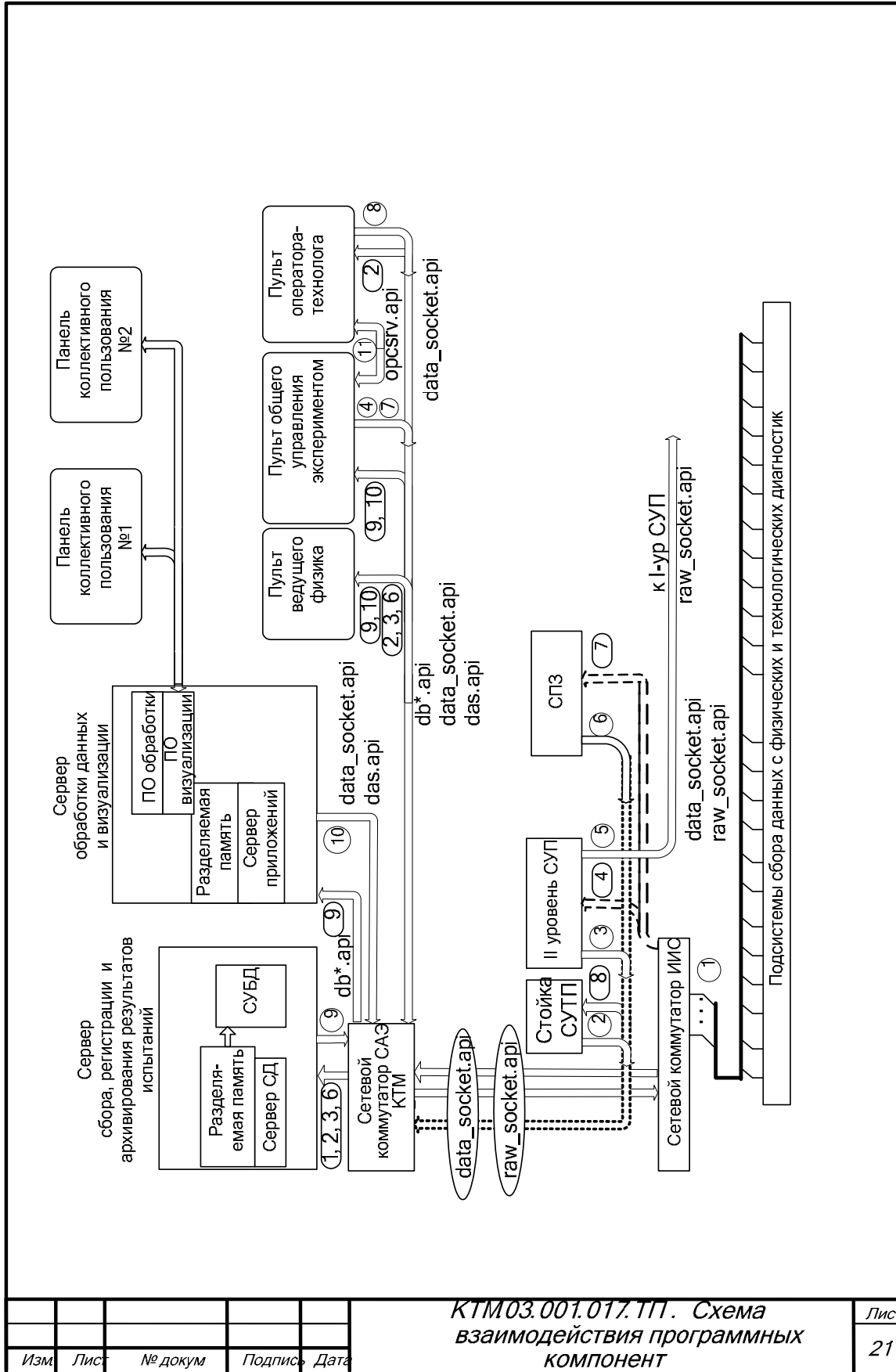
					КТМ.03.001.015.ТП. Структура программного обеспечения II уровня ИИС	19
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		



КТМ.03.001.016.ТТ. Архитектура программного обеспечения III и IV уровней ИИС

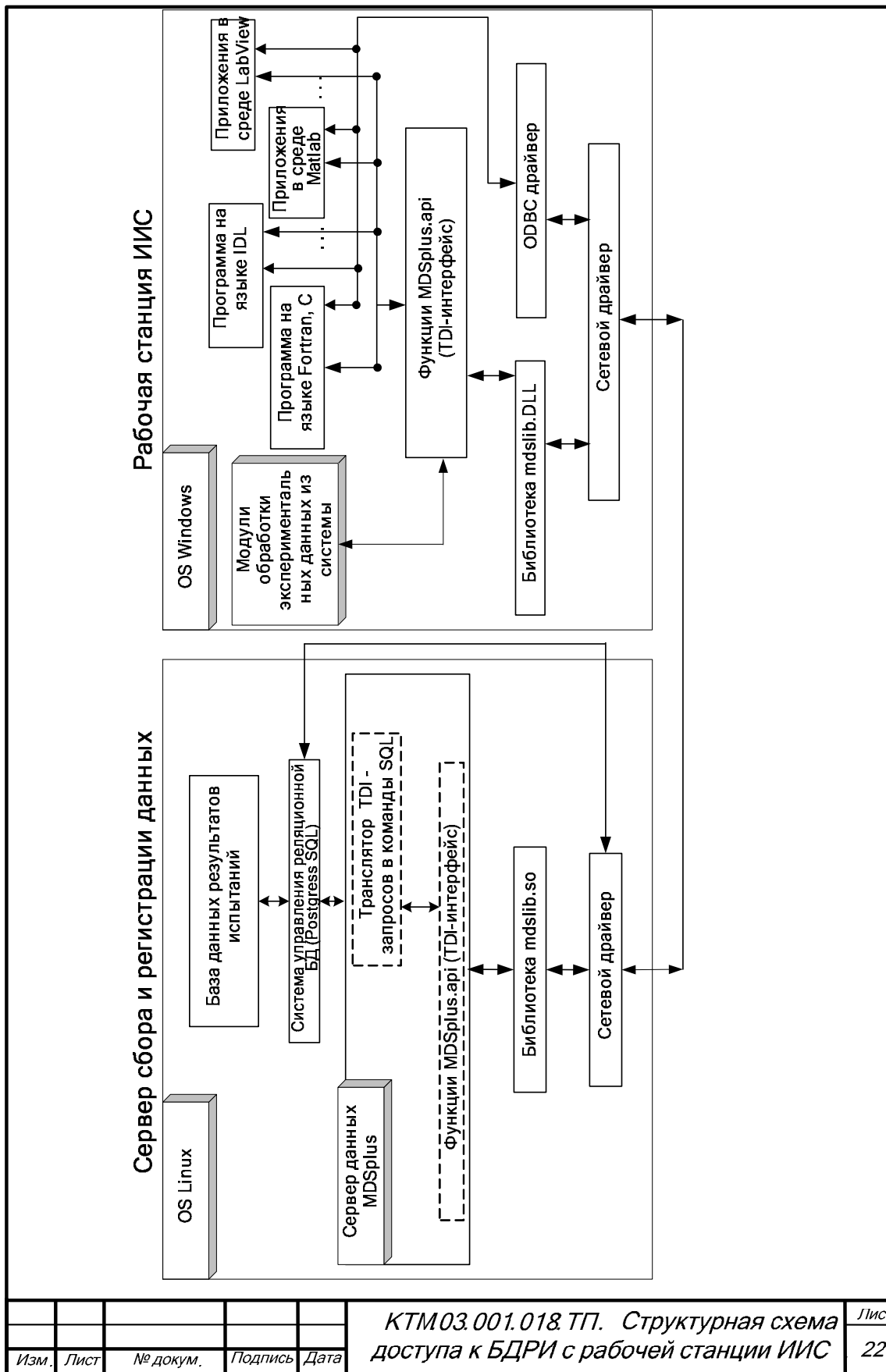
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата
------	------	----------	---------	------

Лист 20

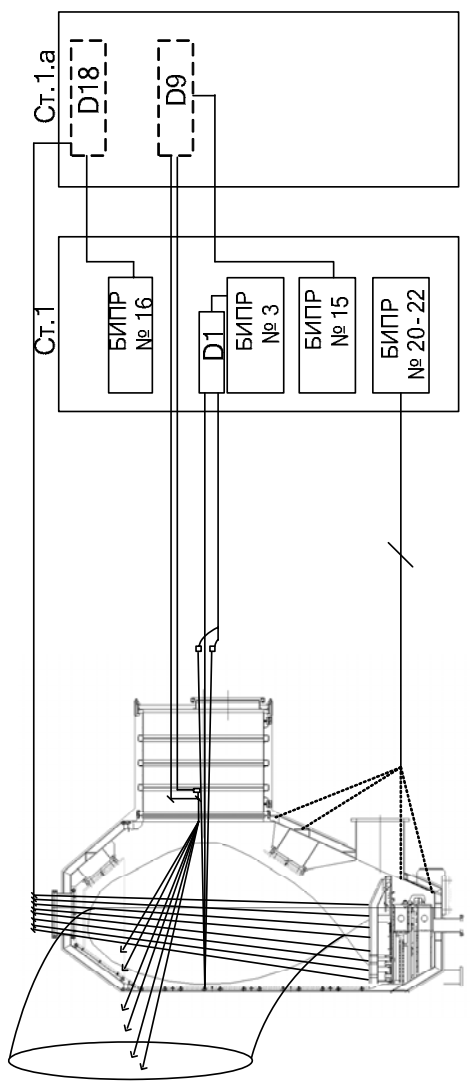


КТМ03.001.017.1П. Схема взаимодействия программных КОМПОНЕНТ

Изм.	Лист	№ докум	Подпись	Дата

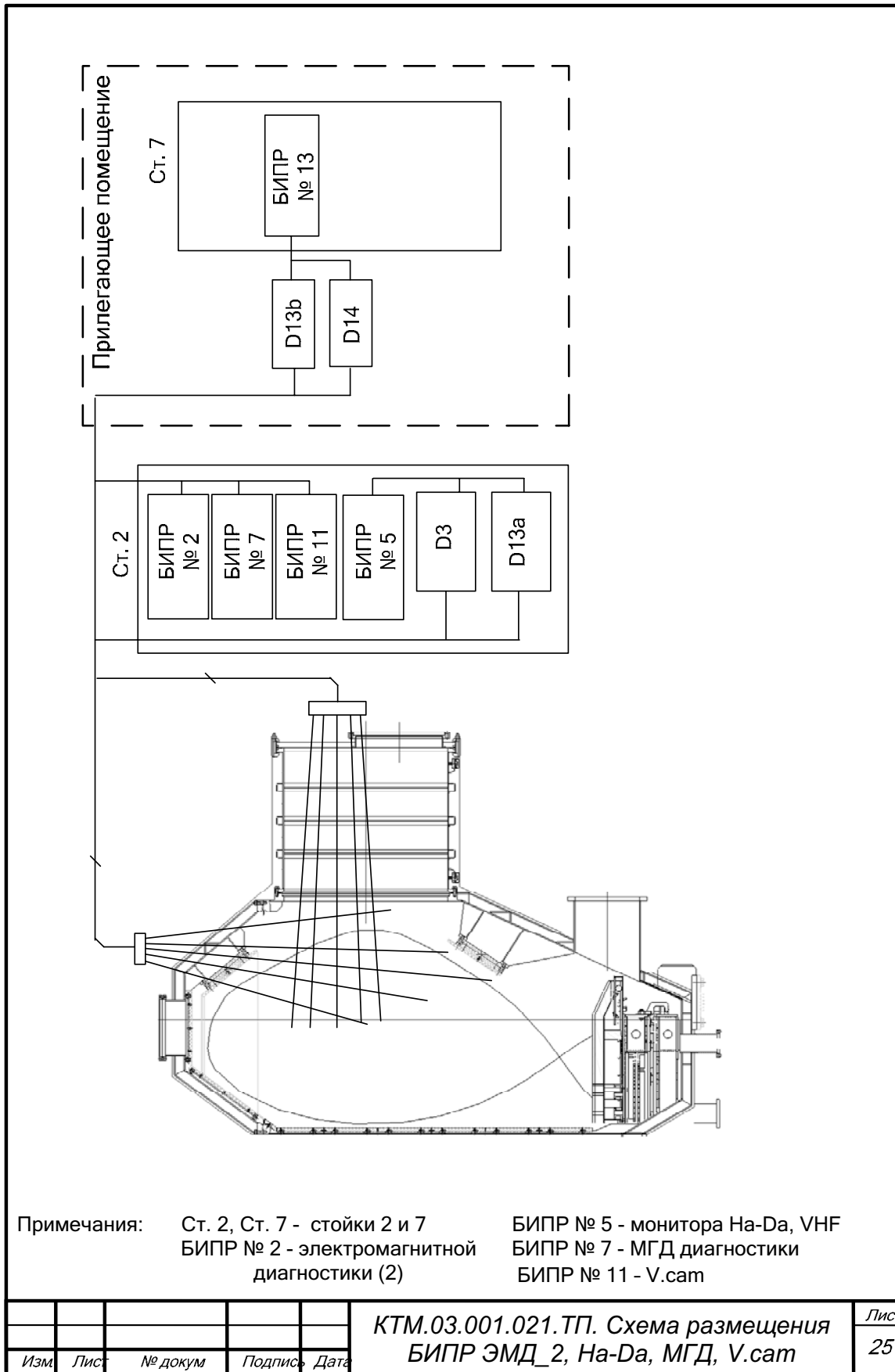


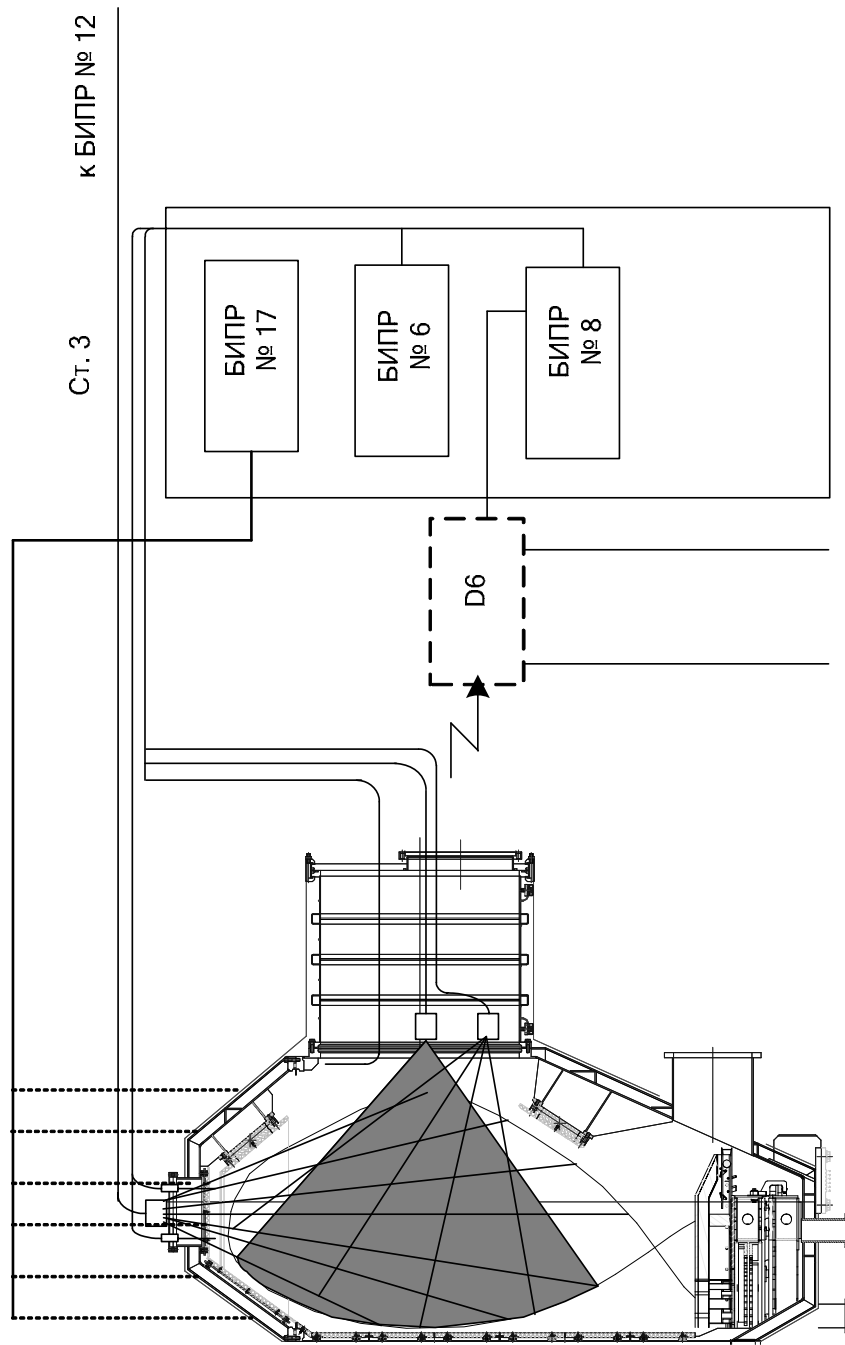
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	КТМ03.001.018.ТП. Структурная схема доступа к БДРИ с рабочей станции ИИС	Лист
						22



Примечания
 Ст. 1 - Стойка 1
 БИПР № 3 - БИПР одноканального интерферометра
 БИПР № 15 - БИПР интерферометра Х-точки
 БИПР № 20-22 - БИПР диагностики контактная термометрия

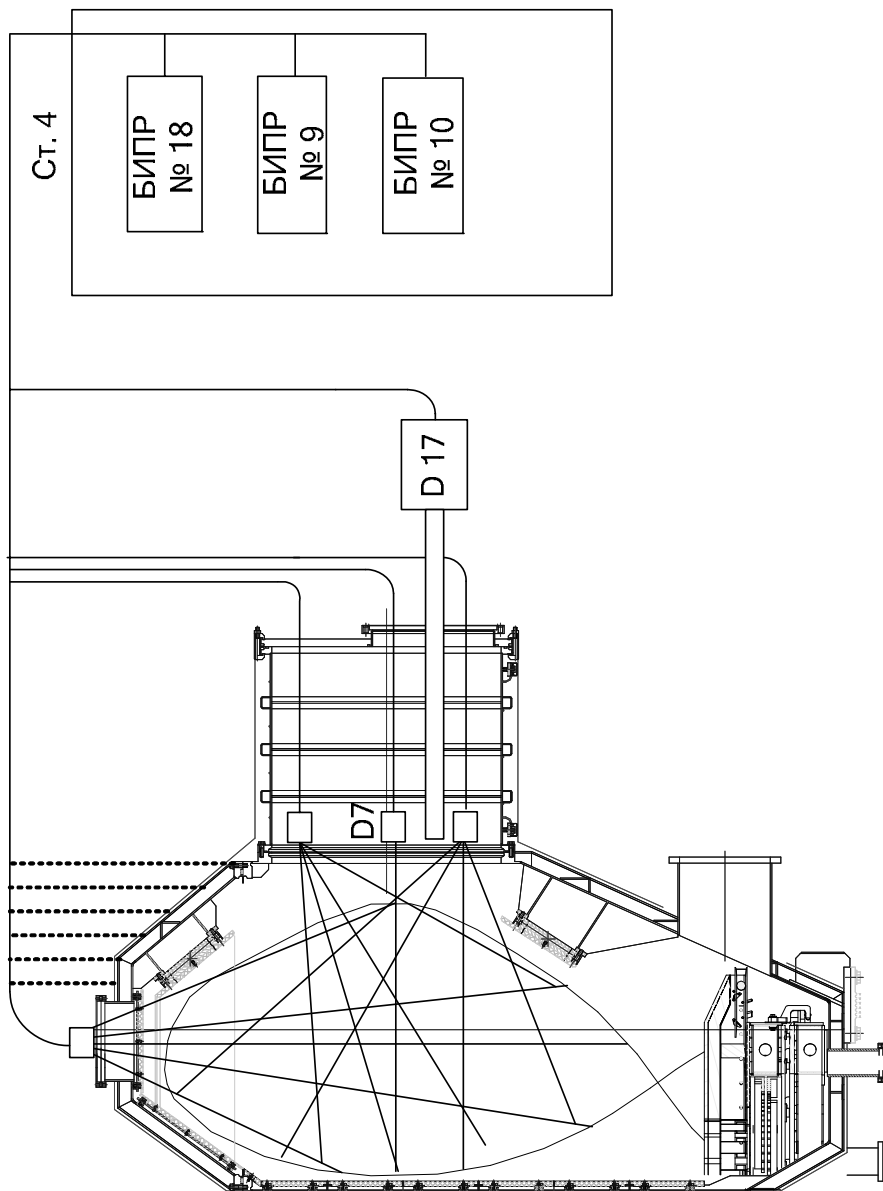
					КТМ.03.001.020.ТП. Схема размещения БИПР ОИ, ДТМ_1, Х-интерферометра	Лист
Изм	Лист	№ докум	Подпись	Дата		24





Примечания :
 Ст. 3 – стойка 3
 БИПР № 6 - БИПР ДПРП
 БИПР № 8 - БИПР ДЖРИ
 БИПР № 17 - БИПР ДКТ_1

					КТМ.03.001.022.ТП. Схема размещения БИПР ДПРП, ДЖРИ, ДКТ_1	Лист
Изм	Лист	№ докум	Подпись	Дата		26



Примечания:

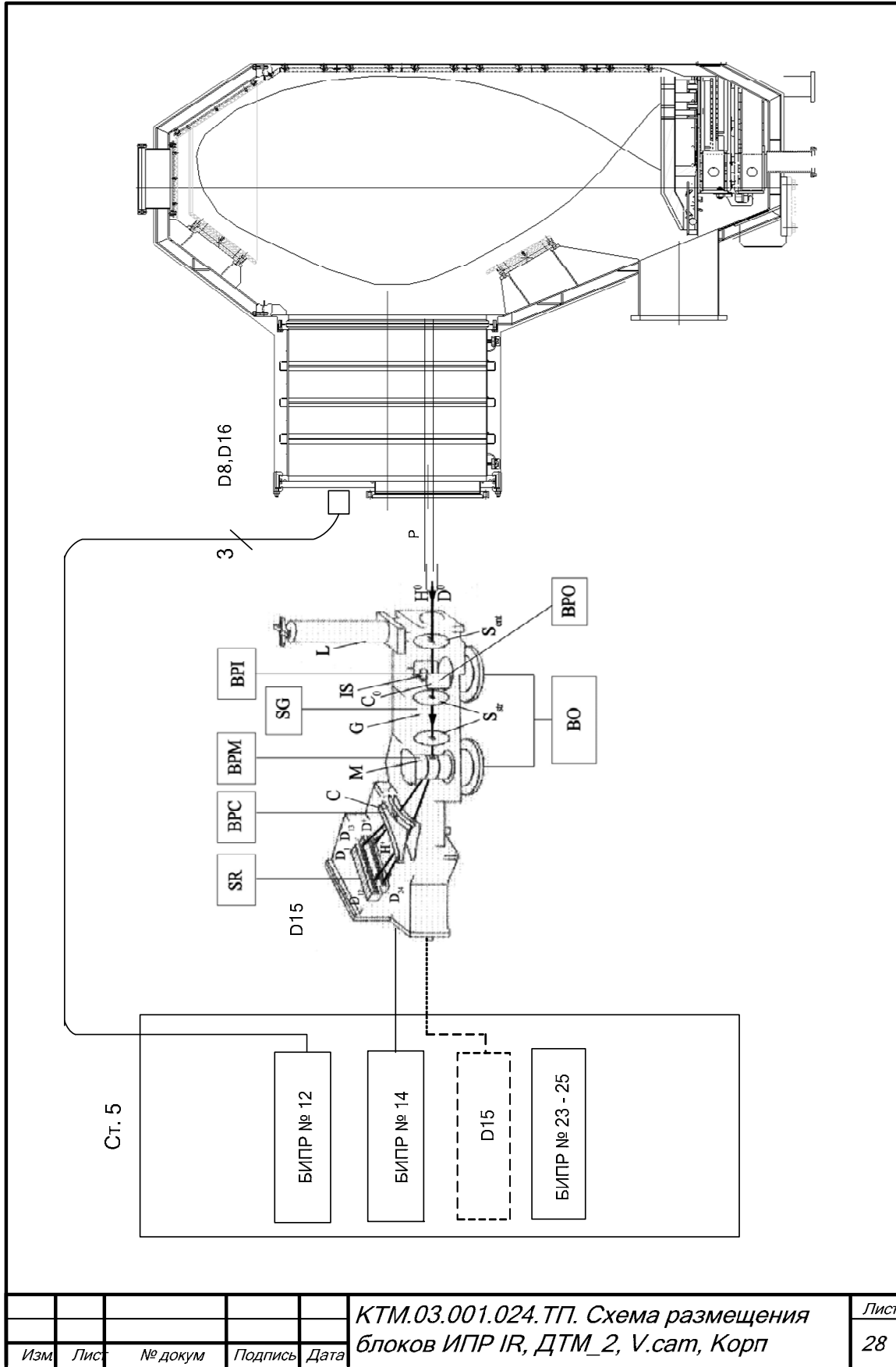
Ст. - стойка 4

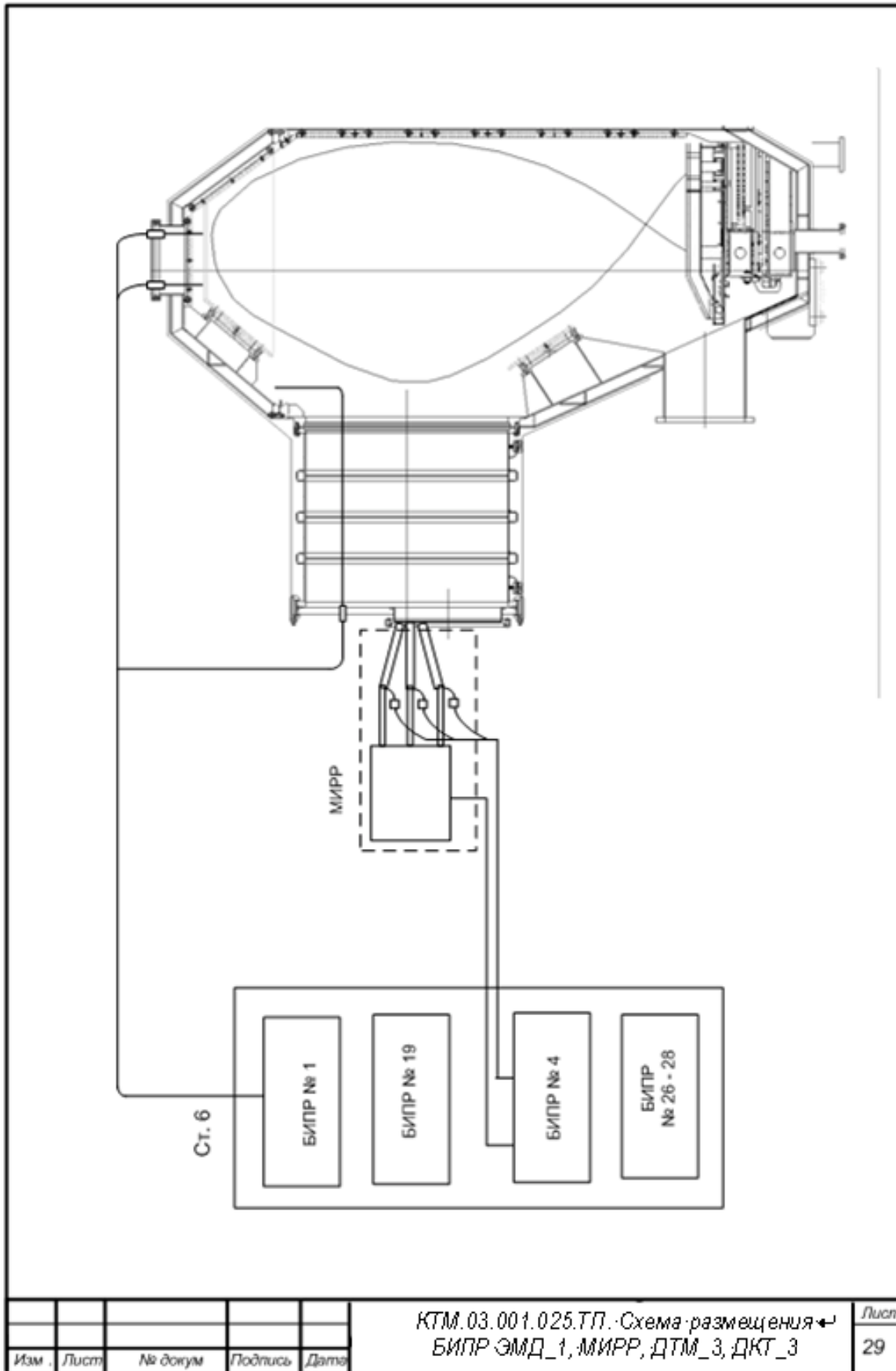
БИПР № 18 - БИПР ДКТ_2

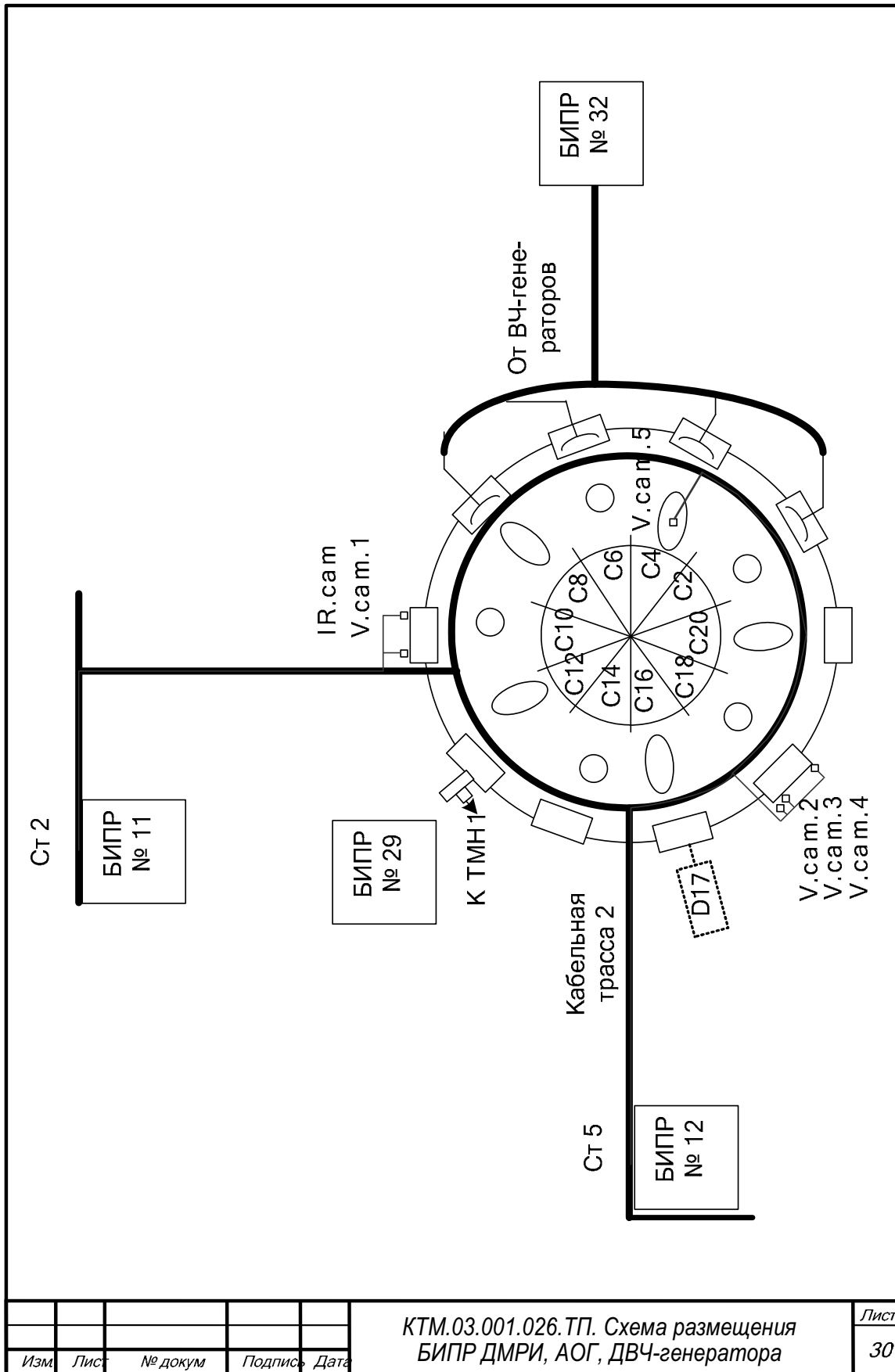
БИПР № 6 - БИПР ДПРП

БИПР № 8 - БИПР ДЖРИ

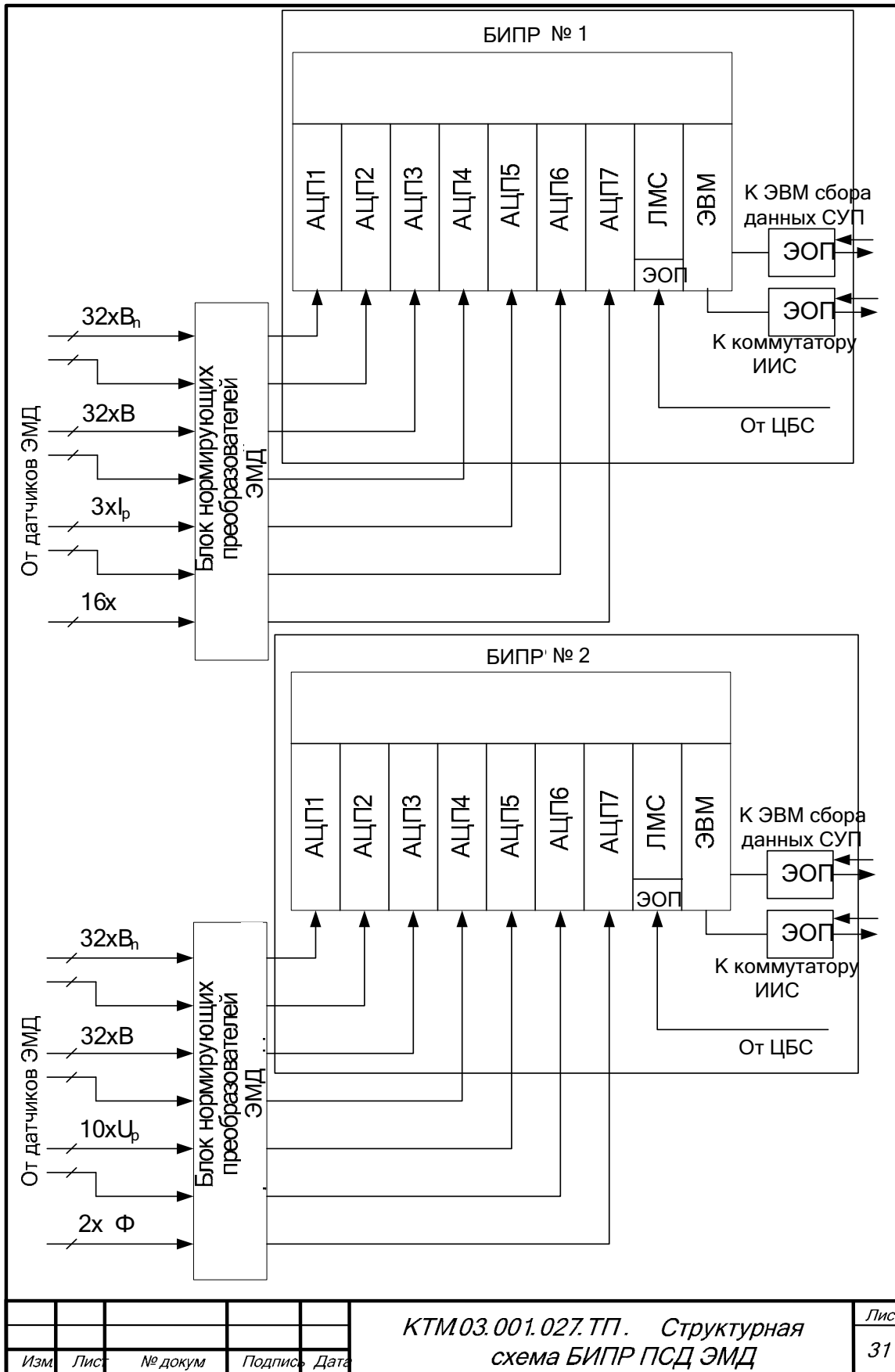
					КТМ03.001.023.ТП. Схема размещения блоков ИПР РТС, СП.обз., ДКТ_2	Лист
Изм.	Лист	№ докум	Подпись	Дата		27







Изм.	Лист	№ докум	Подпись	Дата	КТМ.03.001.026.ТП. Схема размещения БИПР ДМРИ, АОГ, ДВЧ-генератора	Лист
						30

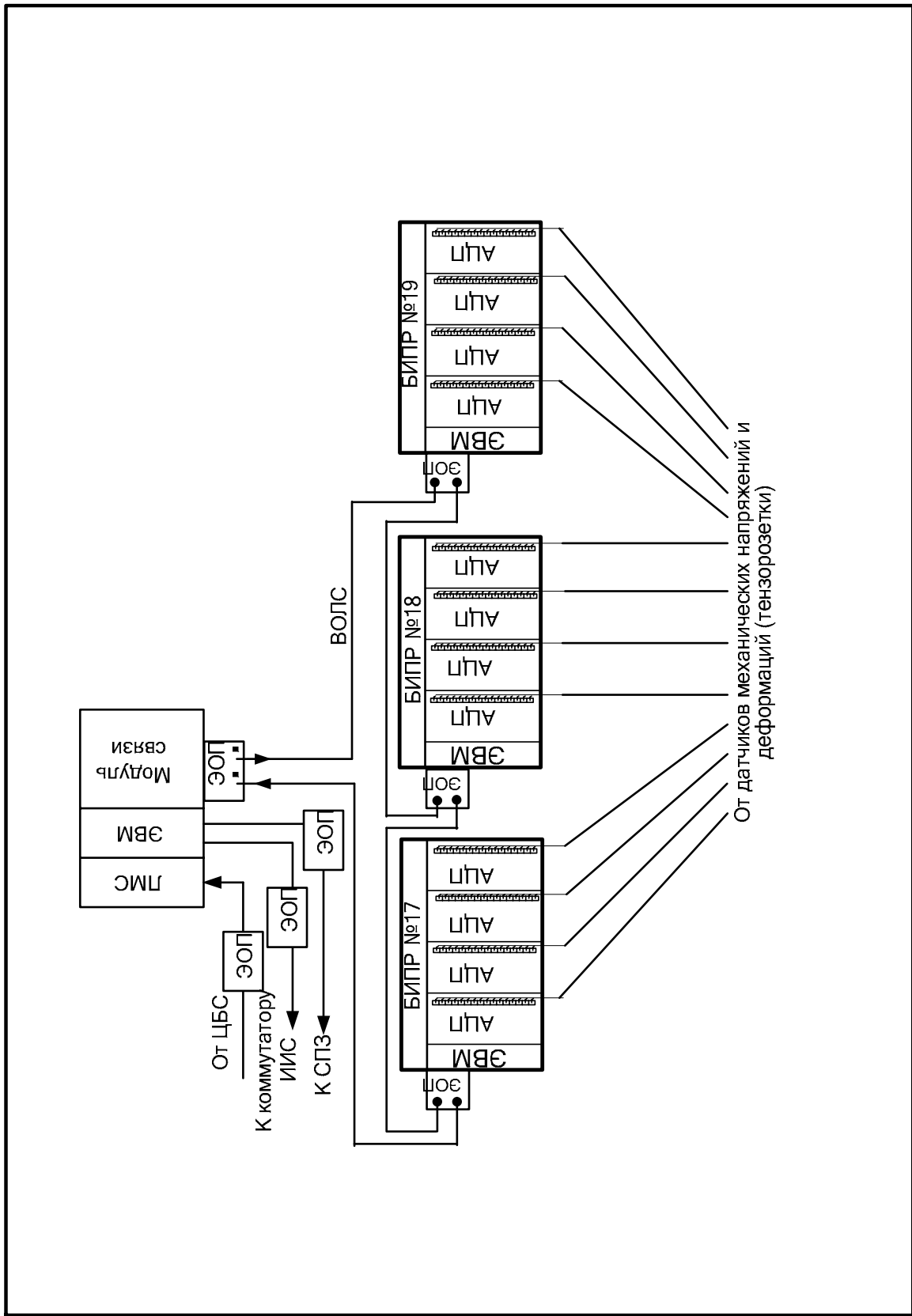


КТМ.03.001.027.ТП. Структурная
схема БИПР ПСД ЭМД

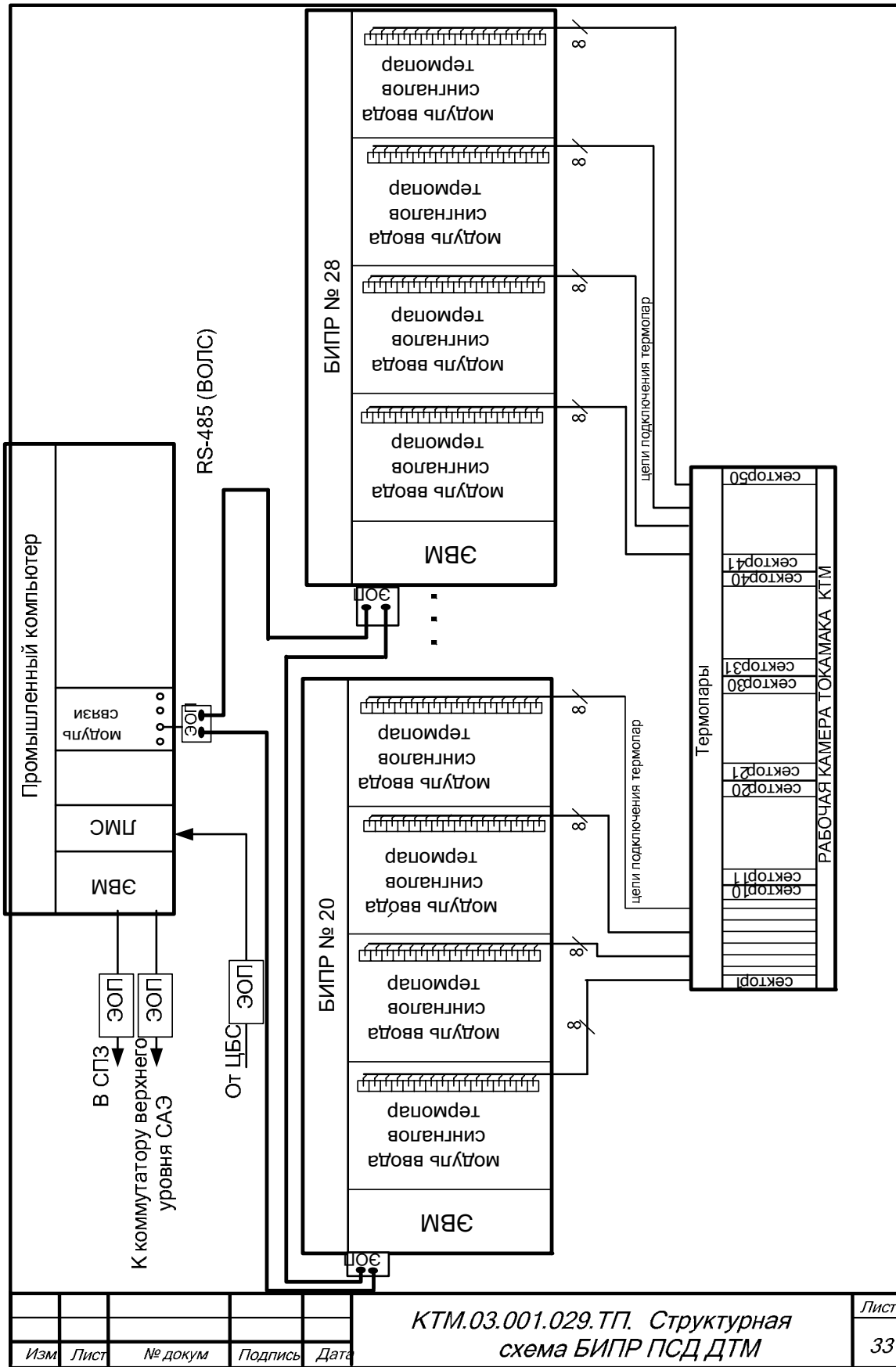
Лист

31

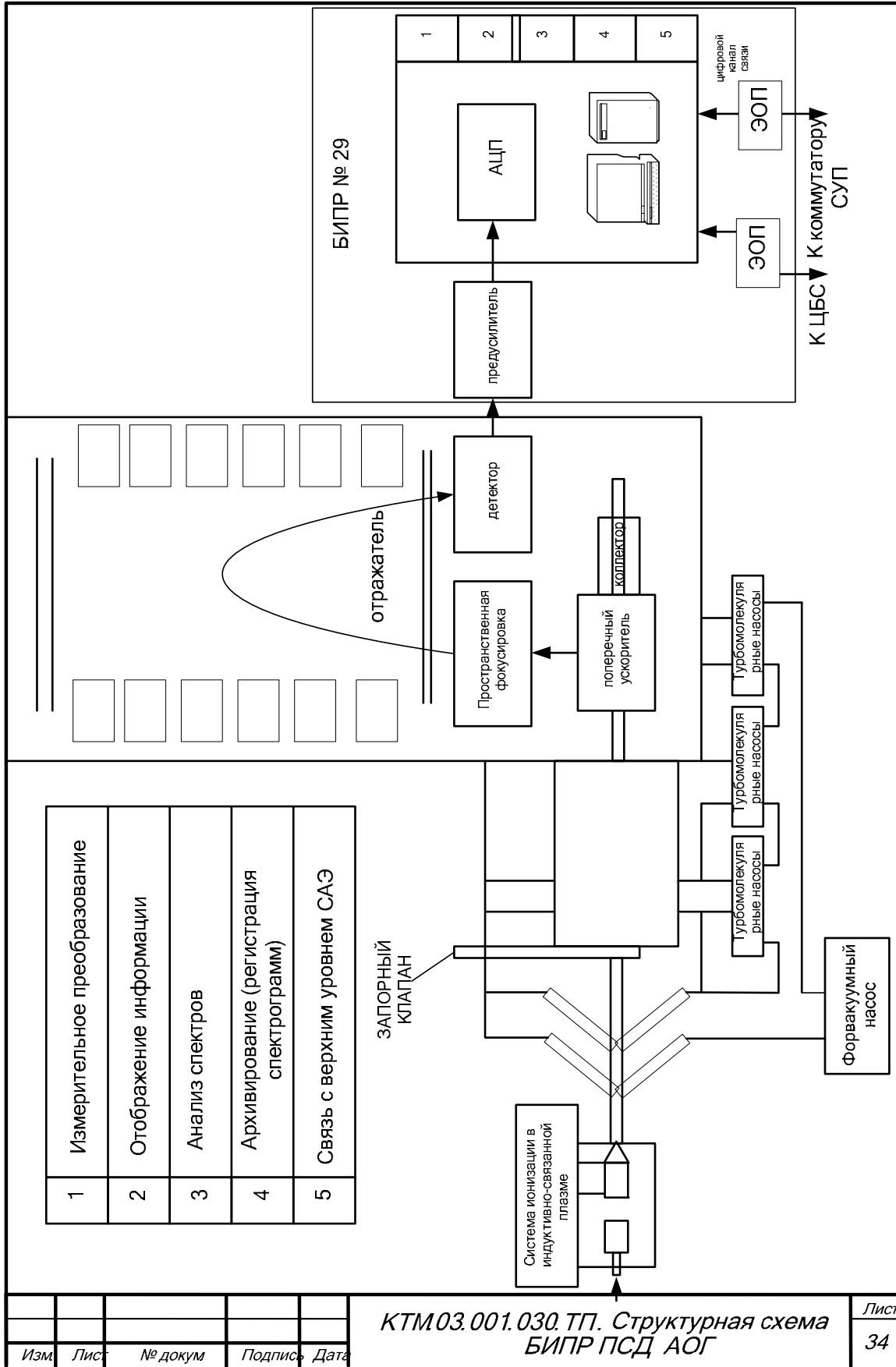
Изм.	Лист	№ докум	Подпись	Дата
------	------	---------	---------	------



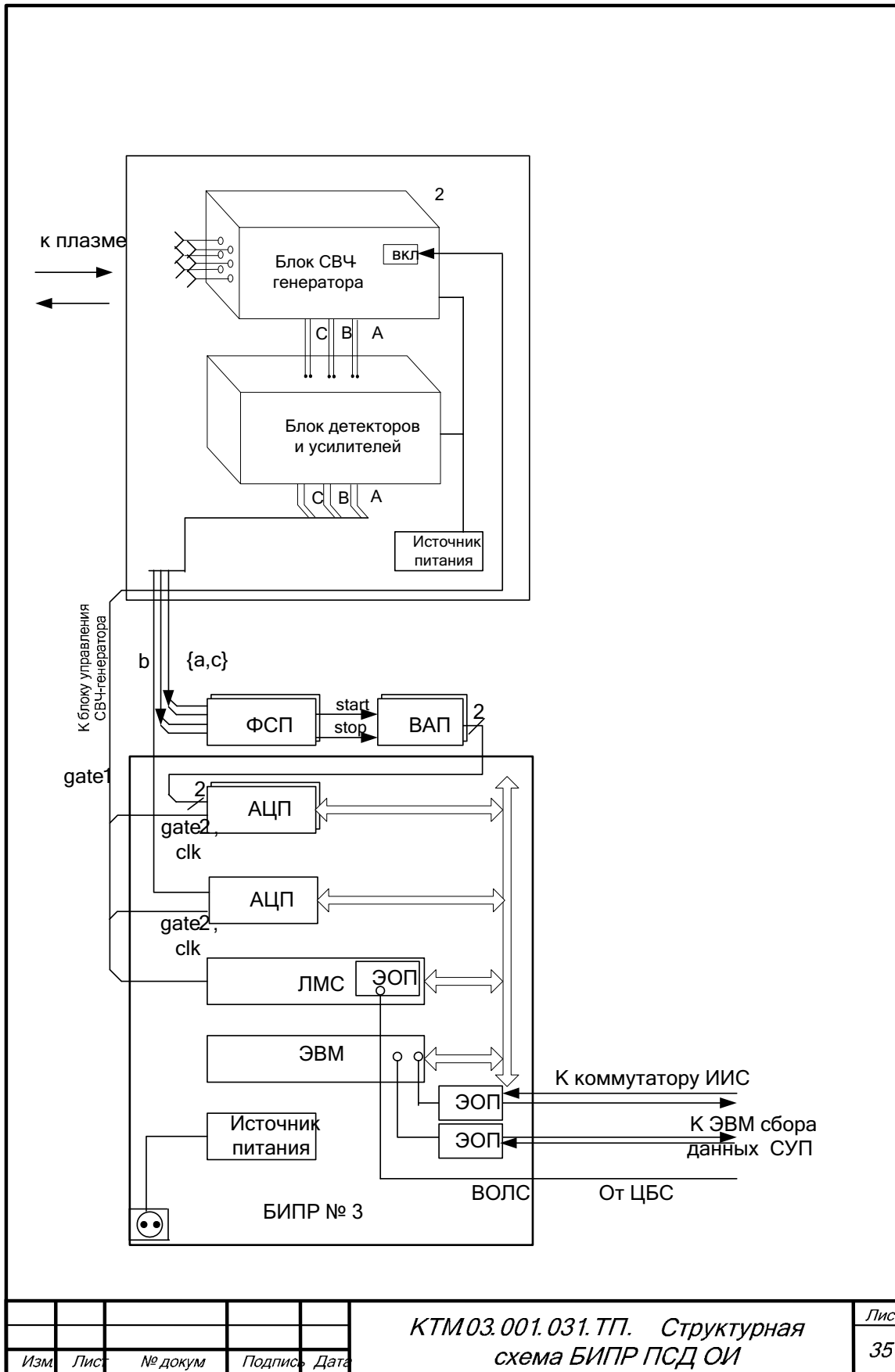
КТМ.03.001.028.ТП. Структурная схема БИПР ПСД ДКТ					Лист 32
Изм.	Лист	№ докум	Подпись	Дата	



					КТМ.03.001.029.ТП. Структурная схема БИПР ПСД ДТМ	Лист
Изм	Лист	№ докум	Подпись	Дата		33

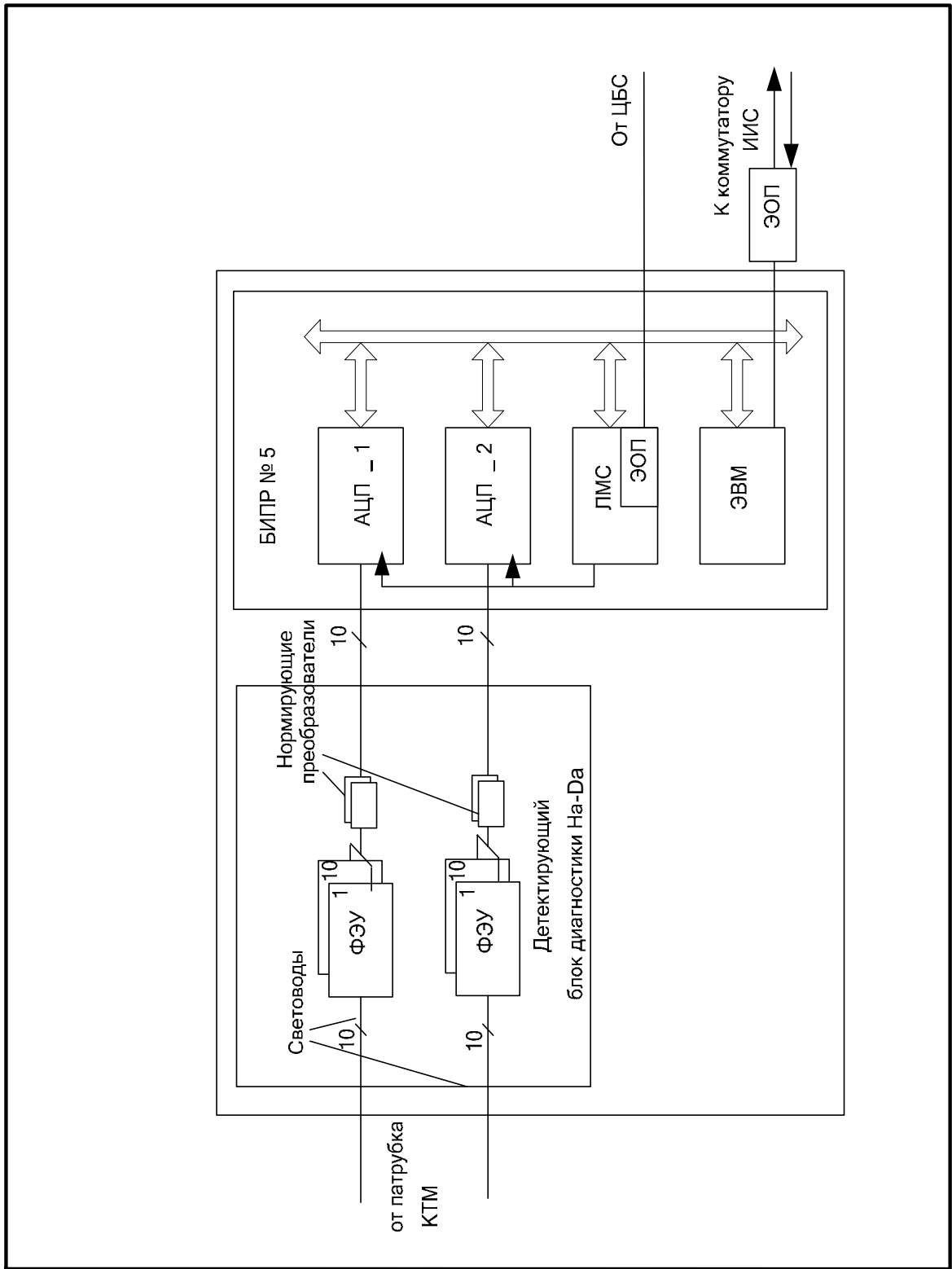


КТМ.03.001.030. ТП. Структурная схема БИПР ПСД АОГ

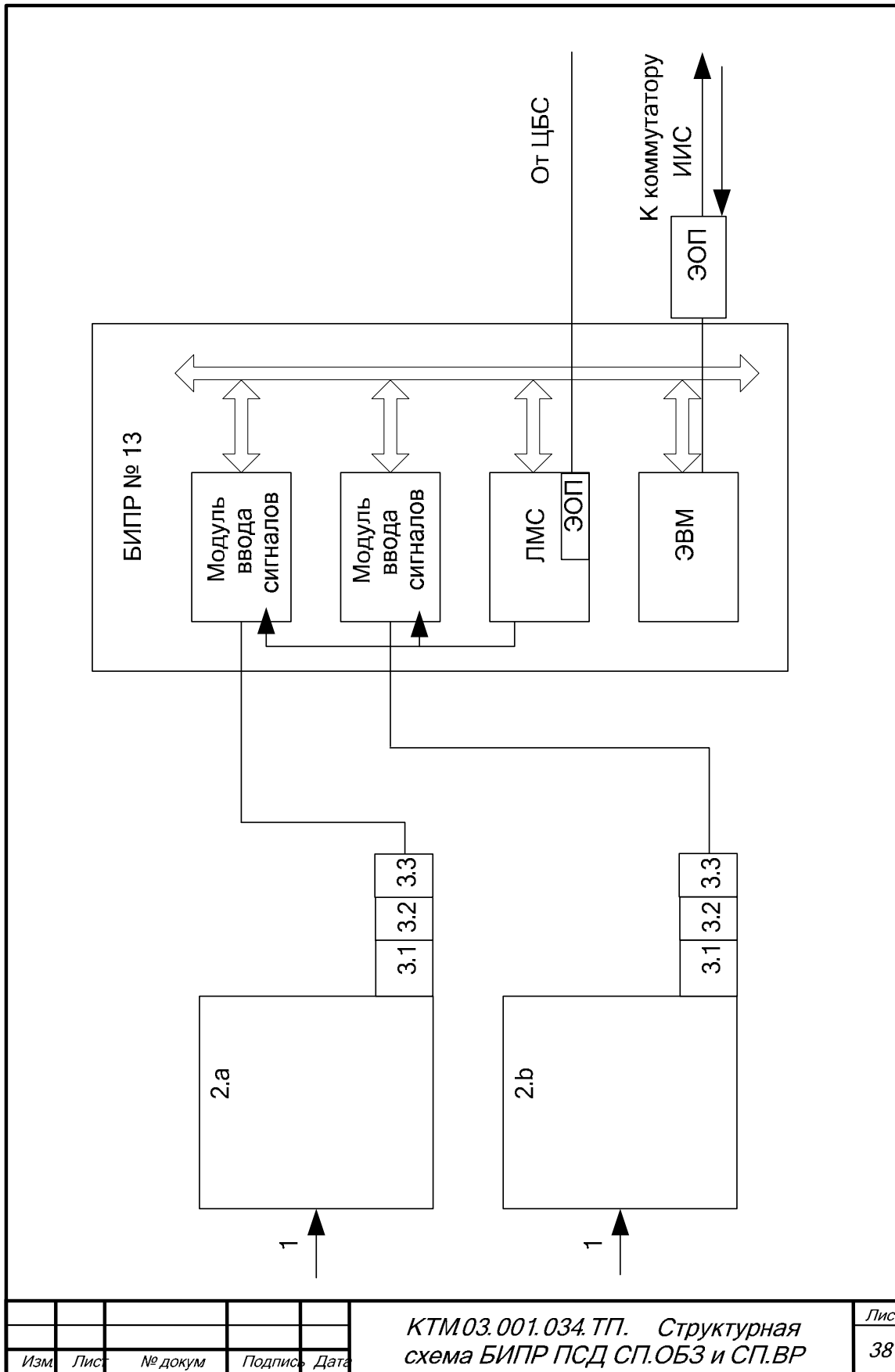


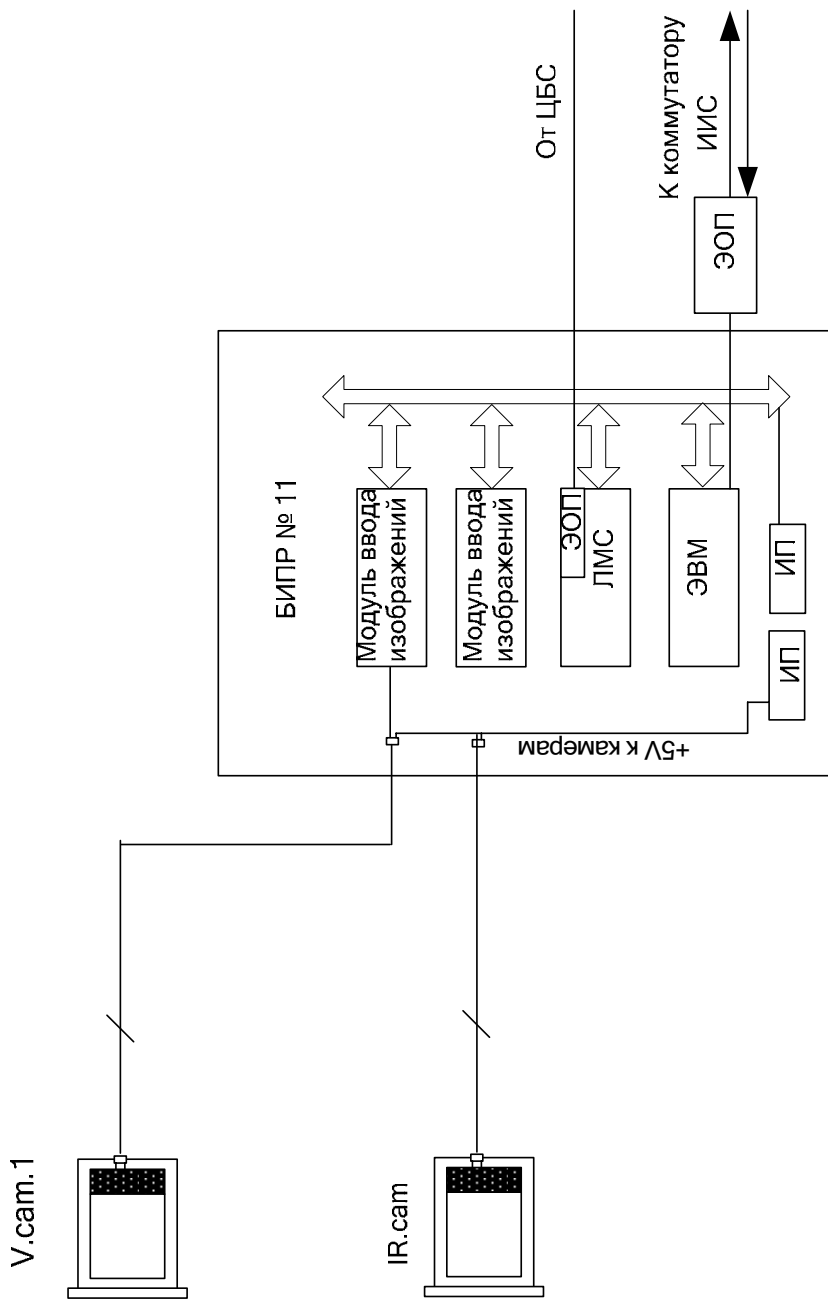
КТМ 03.001.031.ТП. Структурная
схема БИПР ПСД ОИ

Изм.	Лист	№ докум	Подпись	Дата

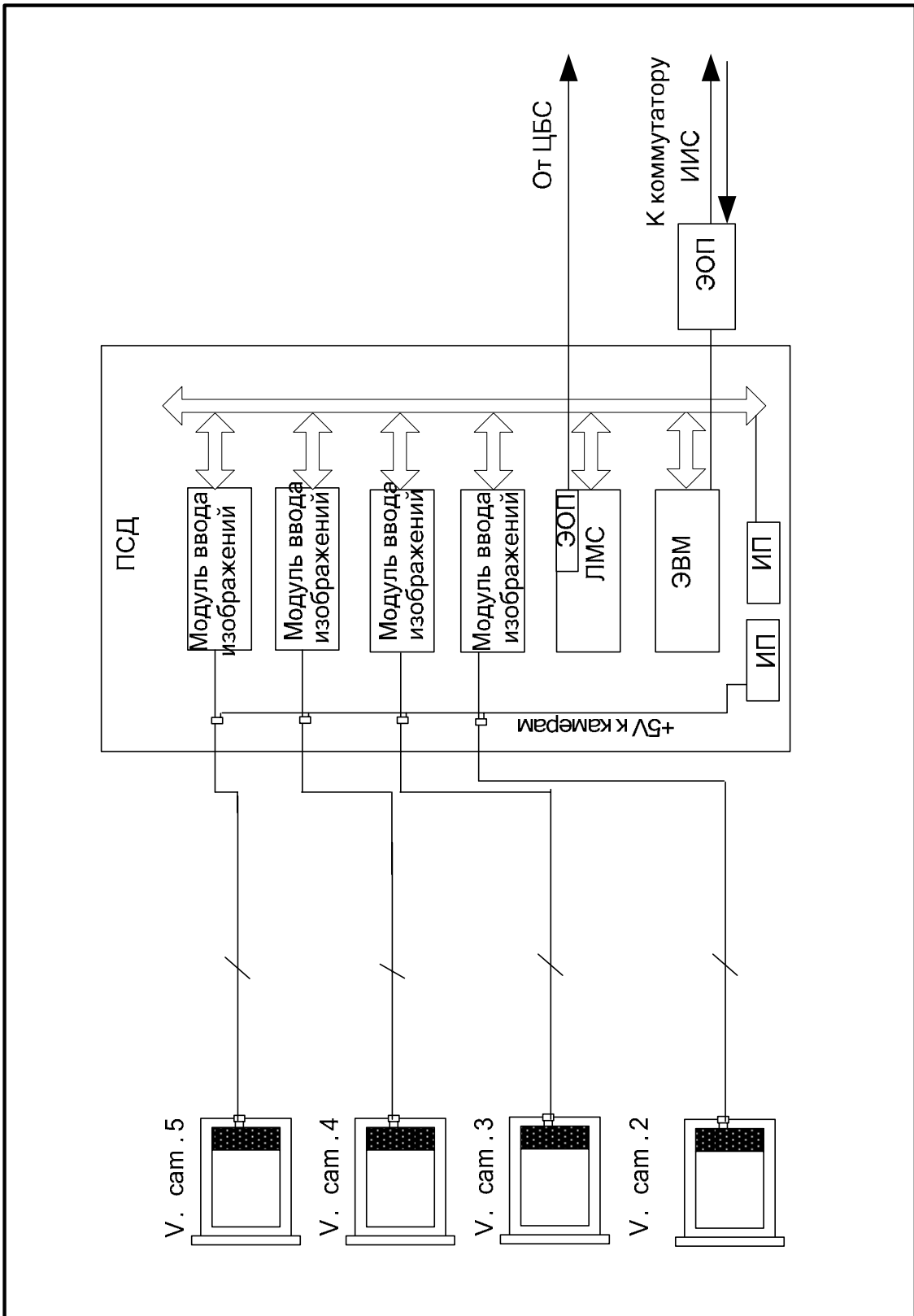


					КТМ.03.001.033.ТП. Структурная схема БИПР ПСД На-Да и монитора ВУФ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		37

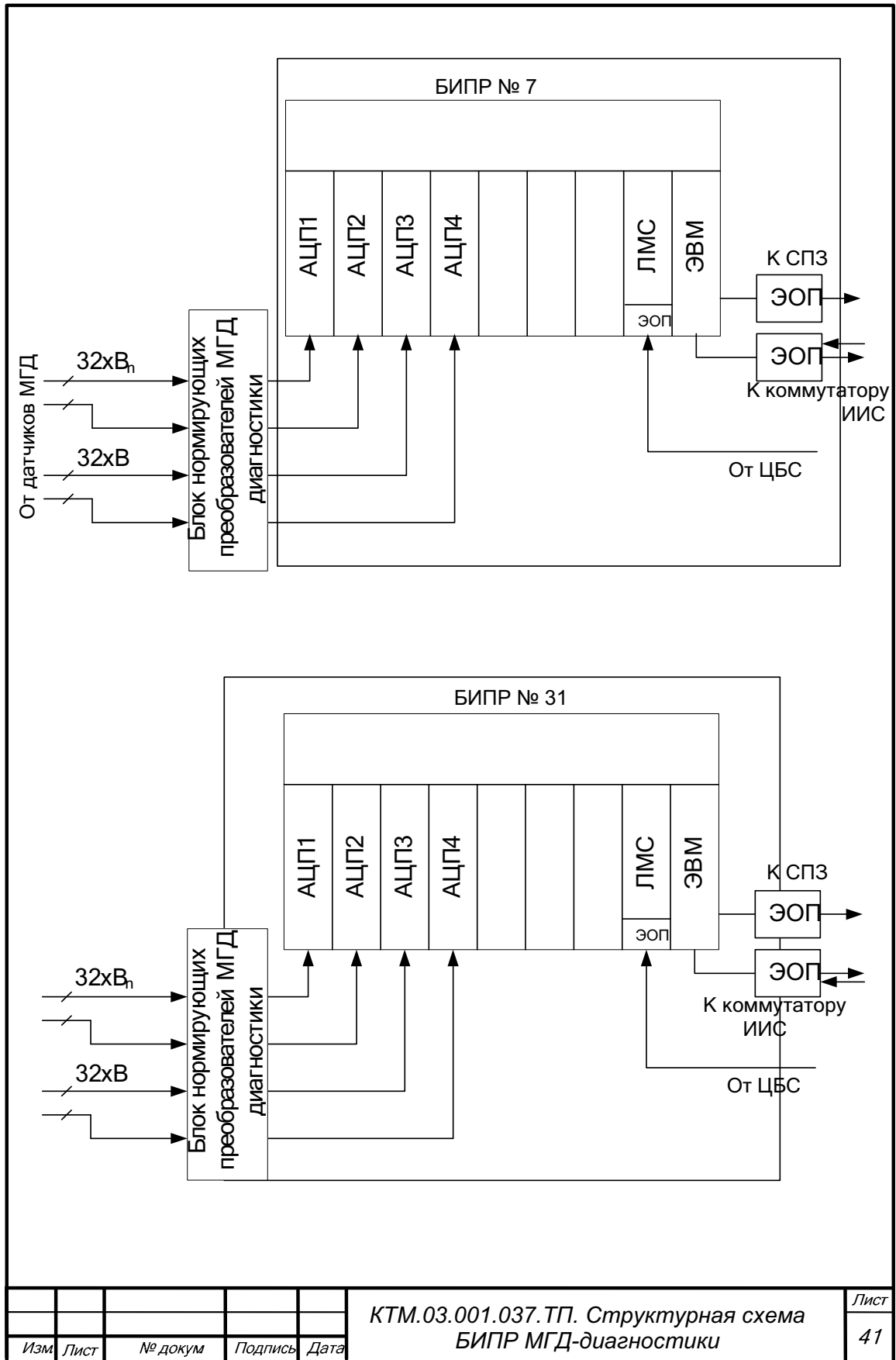




					КТМ03.001.035.ТП. Структурная схема БИПР ПСД высокоскоростных ИК-камер и видеокамер наблюдения дивертора	Лист
Изм.	Лист	№ докум	Подпись	Дата		39

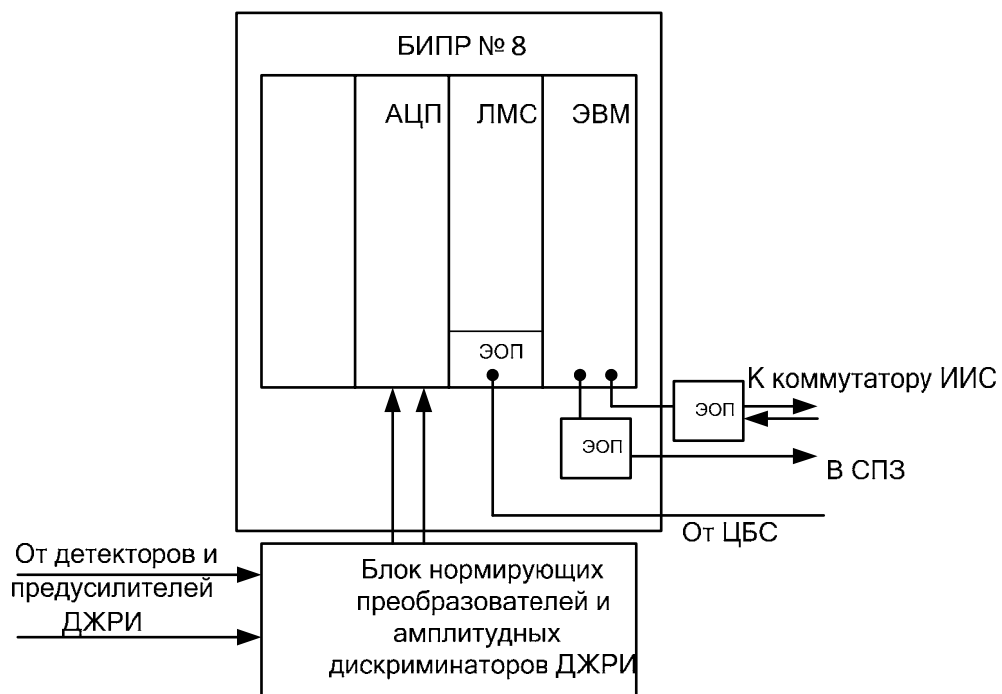


					КТМ.03.001.036.ТП. Структурная схема БИПР ПСД дополнительных видеокамер наблюдения критических зон	Лист
Изм .	Лист	№ докум	Подпись	Дата		40

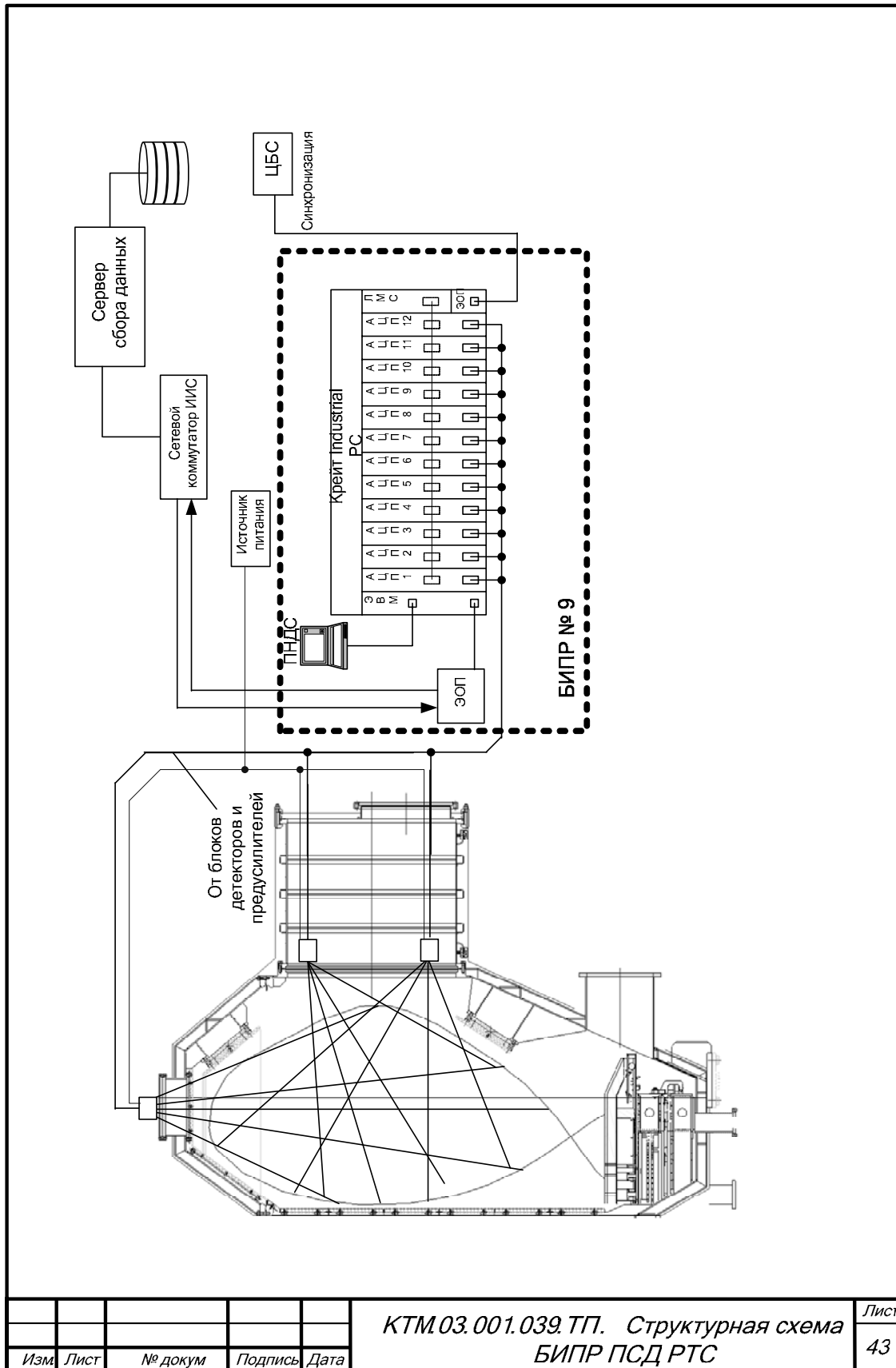


Изм.	Лист	№ докум	Подпись	Дата
------	------	---------	---------	------

КТМ.03.001.037.ТП. Структурная схема
БИПР МГД-диагностики



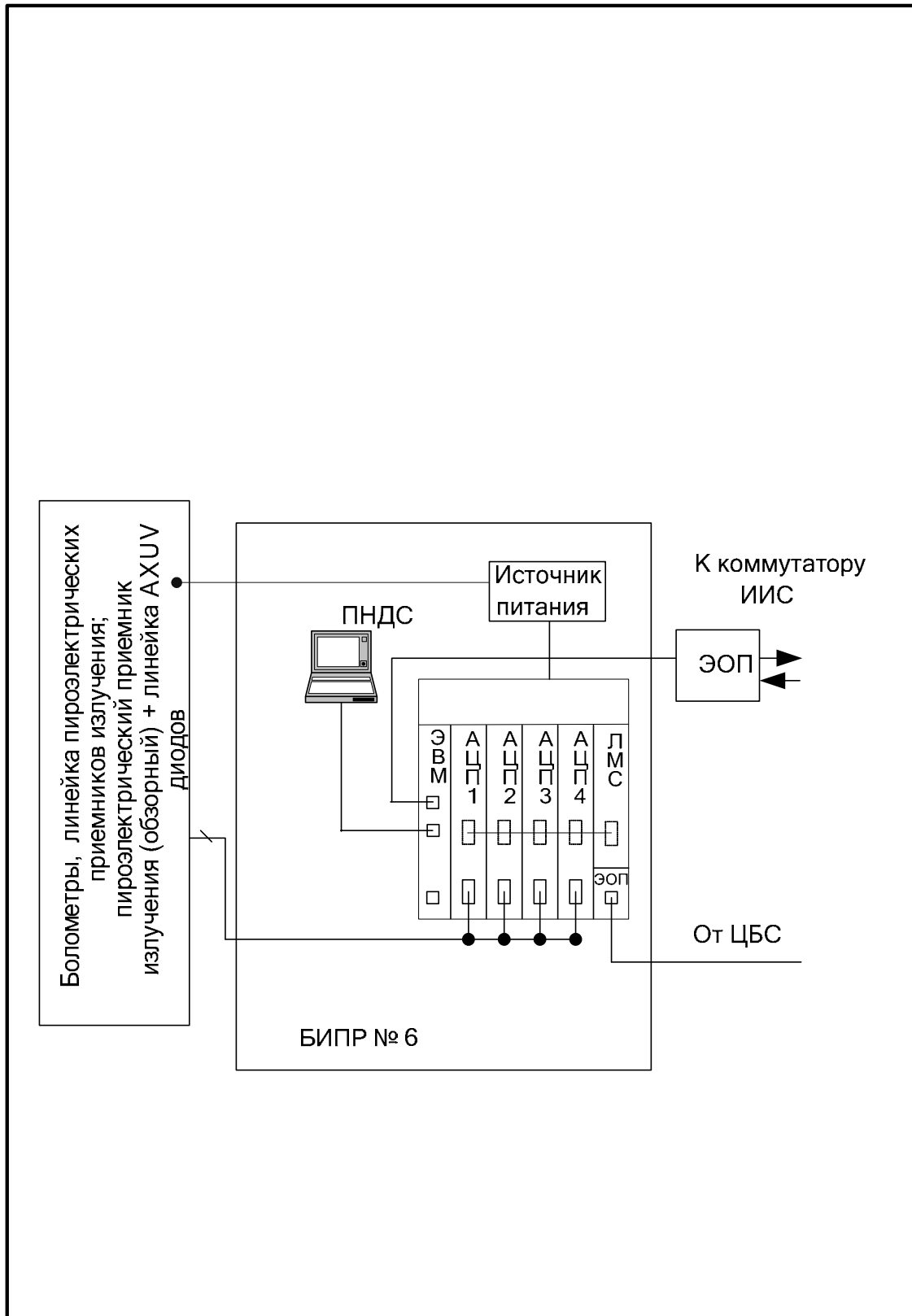
					КТМ 03.001.038.ТП. Структурная схема БИПР ПСД ДЖРИ	Лист
Изм.	Лист	№ докум	Подпись	Дата		42



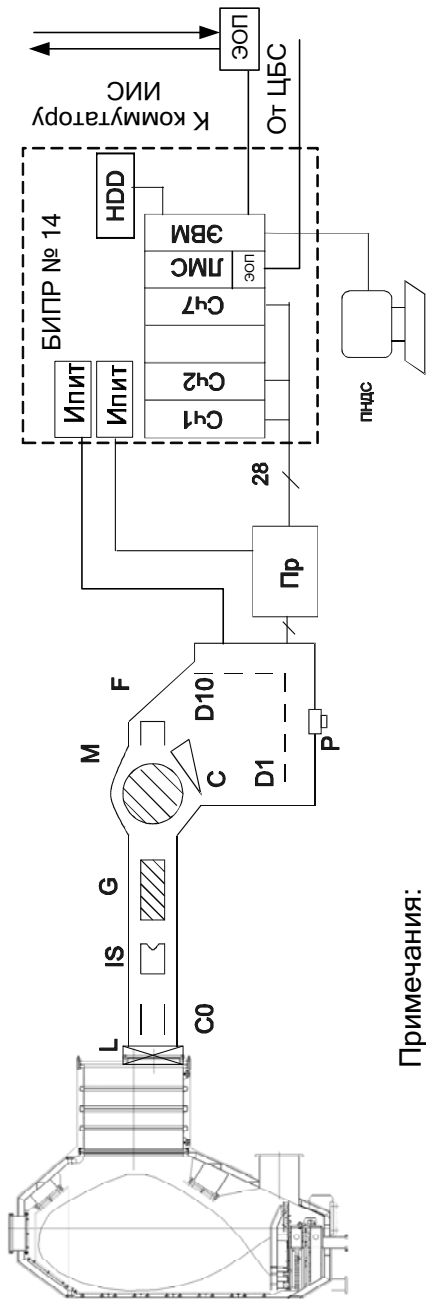
Изм	Лист	№ докум	Подпись	Дата

КТМ.03.001.039.ТП. Структурная схема
БИПР ПСД РТС

Лист
43



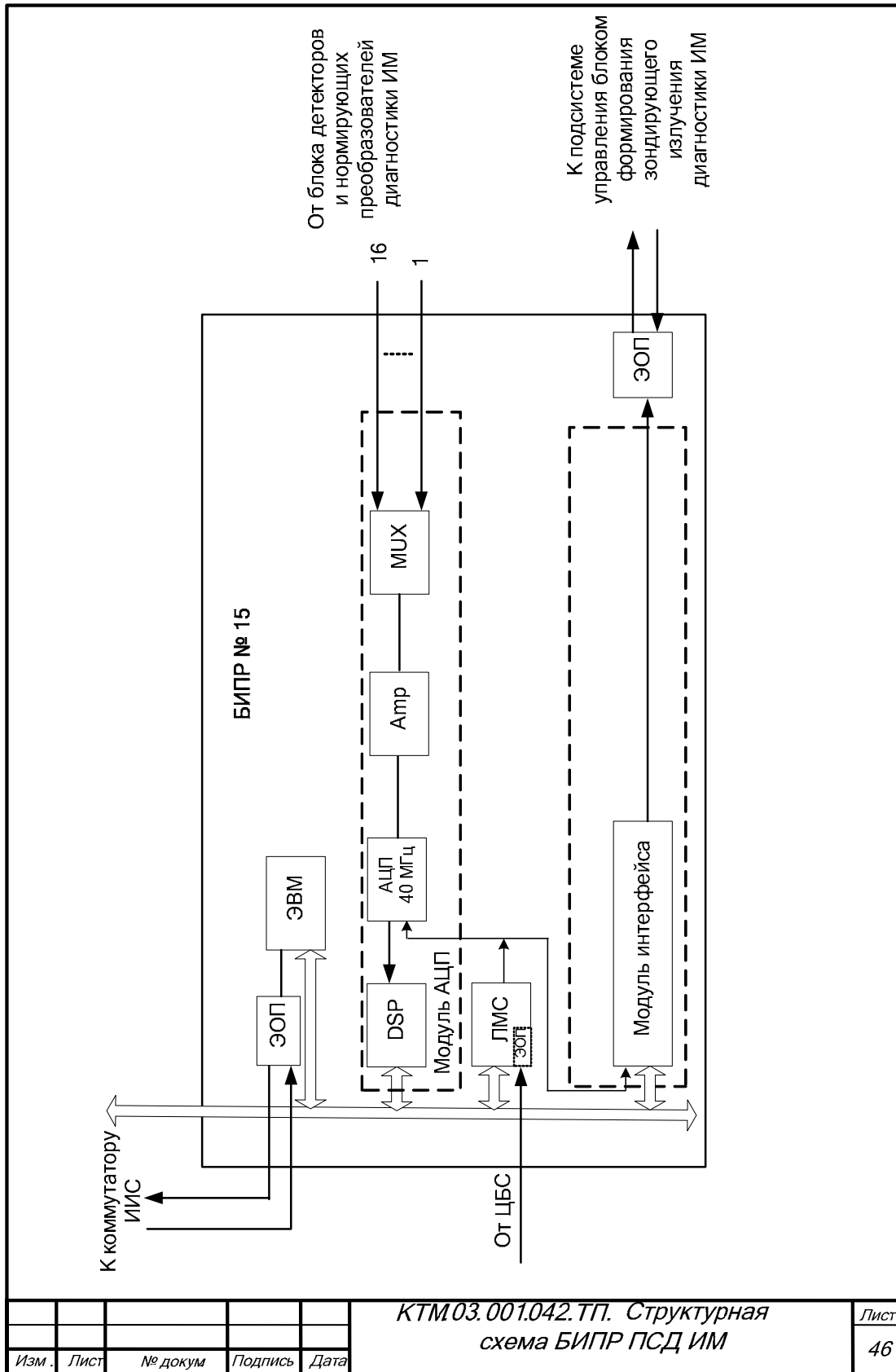
					КТМ 03.001.040.ТП. Структурная схема БИПР ПСД ДПРП	Лист
Изм.	Лист	№ докум	Подпись	Дата		44



Примечания:

- L - вакуумный затвор;
- CO - конденсатор очистки (от заряженных частиц);
- IS - калиброванный подвижный источник ионов;
- G - камера обдирки;
- M - электромагнит;
- C - анализирующий электростатический конденсатор;
- D1-D28 - детекторные модули;
- F - цилиндр Фарадея;
- P - откачка;
- Пр - блок предусилителей, дискриминаторов, формирователей;
- Сч - счетчики;
- ЛМС - локальный модуль синхронизации;
- ЭВМ - одноплата ЭВМ;
- HDD - жесткий диск;
- ПИДС - пульт настройки диагностической системы.

Изм.	Лист	№ докум	Подпись	Дата	КТМ.03.001.041.ТП. Структурная схема БИПР ПСД корпускулярного анализатора	Лист 45
------	------	---------	---------	------	---	------------



КТМ.03.001.042.ТП. Структурная схема БИПР ПСД ИМ

Изм.	Лист	№ докум	Подпись	Дата

Учебное издание

ПАВЛОВ Вадим Михайлович
ШАРНИН Александр Викторович
МАЙСТРУК Галина Александровна

ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ СИСТЕМА

Учебное пособие

Научный редактор
доктор технических наук,
профессор

В.И. Бойко

Редактор

О.А. Казакова

Верстка

В.П. Аршинова

Дизайн обложки


*О.Ю. Аршинова
О.А. Дмитриев*

Подписано к печати 15.06.2009. Формат 60x84/16. Бумага «Снегурочка».
Печать XEROX. Усл. печ. л. 10.47. Уч.-изд. л. 9,47.
Заказ 686-09. Тираж 200 экз.



Томский политехнический университет
Система менеджмента качества
Томского политехнического университета сертифицирована
NATIONAL QUALITY ASSURANCE по стандарту ISO 9001:2000



ИЗДАТЕЛЬСТВО  ТПУ. 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30.