

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

---

**В.М. Павлов, А.В. Обходский,  
Ю.Н. Голобоков, А.В. Овчинников**

## **СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ПЛАЗМОЙ**

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

Издательство  
Томского политехнического университета  
2008

УДК 533.9(075.8)  
ББК 22.333я73  
П12

**Павлов В.М.**

П12 Система управления плазмой: учебное пособие / В.М. Павлов, А.В. Обходский, Ю.Н. Голобоков, А.В. Овчинников. — Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2008. — 152 с.

ISBN 5-98298-337-3

В пособии изложены научные и инженерные основы проектирования системы управления плазмой установок по управляемому термоядерному синтезу, алгоритмы управления формой, положением, плотностью, энергосодержанием и током плазменного тора. Предложены технические решения по реализации описанных алгоритмов на основе проектных решений Казахстанского токамака материаловедческого.

Пособие 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».

УДК 533.9(075.8)  
ББК 22.333я73

*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 5-98298-337-3

© Павлов В.М., Обходский А.В.,  
Голобоков Ю.Н., Овчинников А.В., 2008  
© Томский политехнический университет, 2008  
© Оформление. Издательство Томского  
политехнического университета, 2008

## СОДЕРЖАНИЕ

Введение .....	7
1. Система управления плазмой (СУП) .....	8
1.1. Структурно-функциональная схема СУП .....	8
1.1.1. Контур управления положением и формой плазмы .....	14
1.1.1.1. Структурная схема контура. Алгоритм управления положением и формой плазмы. Алгоритм расчета добавок токов коррекции в обмотках ЭМС .....	17
1.1.1.2. Определение параметров плазмы по данным электромагнитной диагностики .....	21
1.1.1.2.1. Измерение индукции полоидального магнитного поля .....	24
1.1.1.2.2. Измерение потока магнитного поля $\Psi$ .....	26
1.1.1.2.3. Измерение положения плазмы .....	28
1.1.1.2.4. Измерение тока плазмы $I_p$ .....	30
1.1.1.2.5. Измерение индукции тороидального поля и диамагнитного потока .....	31
1.1.1.3. Алгоритм восстановления профиля сечения плазменного шнура .....	31
1.1.1.4. Измерение положения внешней границы плазмы и распределения плотности плазмы по радиусу .....	40
1.1.1.5. Измерение интенсивности мягкого рентгеновского излучения и температуры электронов .....	43
1.1.2. Контур управления положением плазмы .....	44
1.1.2.1. Структурная схема контура .....	45
1.1.2.2. Закон управления положением плазмы .....	46
1.1.3. Контур управления током плазмы .....	48
1.1.3.1. Структурно-функциональная схема контура управления током плазмы .....	49
1.1.3.2. Синтез цифрового регулятора .....	54
1.1.3.3. Алгоритм работы контура управления током плазмы .....	55
1.1.4. Контур управления плотностью плазмы .....	57
1.1.4.1. Измерение средней плотности электронов .....	59
1.1.5. Контур управления ВЧ-нагревом плазмы .....	60
1.1.5.1. Расчёт скорости ввода ВЧ-энергии в плазму КТМ .....	60
1.1.5.2. Анализ процессов поглощения и распространения волн в плазме КТМ .....	62
1.1.5.3. Влияние примесей на нагрев плазмы .....	66

1.1.5.4. Структурная схема установки ВЧ-нагрева плазмы ТОКАМАКа КТМ .....	68
1.1.5.5. Алгоритм ввода ВЧ-мощности в плазму ТОКАМАКа КТМ .....	69
1.1.5.6. Подсистема управления ВЧ-нагревом плазмы в ТОКАМАКе КТМ .....	69
1.1.5.7. Каналы измерения параметров ВЧ-системы .....	76
1.1.5.8. Калибровка ВЧ-системы .....	91
2. Алгоритмическое и информационное обеспечение САЭ .....	93
2.1. Оценка требуемой производительности вычислительных устройств реализующих алгоритмы управления плазмой .....	93
2.2. Расчет информационных потоков, пропускной способности интерфейсов и каналов передачи информации .....	99
2.3. Алгоритм работы САЭ КТМ .....	101
3. Общие вопросы технического проекта САУ .....	103
3.1. Структура комплекса технических средств систем управления пусковым режимом .....	103
3.2. Размещение технических средств системы управления пусковым режимом .....	110
3.3. Структура программного обеспечения верхнего уровня САЭ КТМ .	112
3.3.1. Структура верхнего уровня саэ ТОКАМАКа ктм .....	119
3.3.2. Пультовая системы автоматизации экспериментов .....	124
3.4. Архитектура локальной вычислительной сети САЭ КТМ .....	126
Список используемой литературы .....	127
Приложение А (Ведомость чертежей СУП и чертежи) .....	130

## СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ

СУП	система управления плазмой
УТС	установки по управляемому термоядерному синтезу
ЯТЦ	ядерно-топливный цикл
ТОКАМАК [ТОрои- дальная КАмера и МАгнитные Катушки]	комплекс технических и программных средств, необходимых для получения управляемого термоядерного синтеза
АСУ	автоматизированная система управления
ТОУ	технологический объект управления
ПСУ ТС	подсистема управления технологической системы
КТМ	Казахстанский ТОКАМАК материаловедческий
ВЧ	область высоких частот
ОН	омический нагрев
МГД	магнитогидродинамические процессы
ИЦР	ионно-циклотронный резонанс
ЭМС	электромагнитная система
БДРИ	база данных результатов испытаний
ИИС	информационно-измерительная система
РМВ	реальный масштаб времени
ЭМД	электромагнитная диагностика
АЦП	аналого-цифровой преобразователь
УУ	устройство управления ключом инвертора
ПИД	пропорционально-интегрально-дифференциальный
САУ	система автоматического управления
ПД	пропорционально-дифференциальный
ЭС	элемент сравнения
ИП	источник питания
ФИУ	фазоимпульсное управление
САР	система автоматического регулирования
ГНС	система газонапуска
ПОУ	пульт общего управления
БМЗВ	быстрые магнитозвуковые волны
ИАП	импульсный источник питания автогенератора
ЭН	электронагреватель

ПНЧ	преобразователь напряжение-частота
ОДН	омический делитель напряжения
ЕДН	емкостной делитель напряжения
СЛАУ	система линейных алгебраических уравнений
КТС	комплекс технических средств
СПЗ	система противоаварийной защиты
ЭЦР	электронно-циклотронный резонанс
ДМРИ	диагностика мягкого рентгеновского излучения
ДПРП	диагностика полных радиационных потерь
ПО	программное обеспечение
УСО	устройство связи с объектом
АСУТП	автоматизированная система управления технологическим процессом
ИК	измерительный канал
АРМ	автоматизированное рабочее место
САЭ	система автоматизации экспериментов
СУТП	система управления технологическим процессом
ЛВС	локальная вычислительная сеть
ПОТ	пульт оператора технолога
ПВФ	пульт ведущего физика
ПЛИС	программируемая логическая интегральная схема
PF	poloidal field
TF	toroidal field
ITER	International Thermonuclear Experimental Reactor

## **ВВЕДЕНИЕ**

Рассматриваемые в данном учебном пособии вопросы связаны с изучением особенностей функционирования систем управления ТОКАМАКа, работающих в режиме реального времени эксперимента и непосредственно задействованных в процессах получения плазмы и управления плазмо-физическими параметрами.

В первом разделе учебного пособия приведена информация об алгоритмах управления и структурно-функциональных схемах основных контуров управления плазменными процессами:

- формой плазмы;
- положением плазмы;
- током плазмы;
- плотностью плазмы;
- энергосодержанием.

В разделе рассмотрены вопросы определения параметров плазмы по показаниям датчиков и диагностических систем.

Второй раздел содержит информацию о структуре комплекса технических средств для автоматизации процесса управления плазмой в ТОКАМАКе, приведена оценка требуемой производительности вычислительных устройств для реализации алгоритмов.

## 1. СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ПЛАЗМОЙ (СУП)

### 1.1. Структурно-функциональная схема СУП

Основным назначением термоядерной материаловедческой установки – ТОКАМАКа КТМ – является исследование взаимодействий плазма-стенка вакуумной камеры, плазма-пластины дивертора, плазмалимитер при воздействии потоков энергии от 0,1 до 20 МВт/м<sup>2</sup> в широком диапазоне экспозиций и поведения испытуемых материалов в условиях воздействия на них мощных корпускулярных и тепловых потоков, а также переменных и постоянных электрических и магнитных полей, возникающих в процессе плазменных разрядов. Причем, величина этих воздействий должна быть близка к ожидаемым в первом энергетическом реакторе ITER, чтобы можно было сделать вывод о применимости исследуемых материалов для изготовления внутрикамерных элементов этого реактора. Наряду с этим, основными задачами ТОКАМАКа КТМ являются исследования методов снижения тепловых нагрузок на диверторные пластины, достижение рабочих пределов по плотности электронов ( $n_e$ ), бета-плазмы ( $\beta$ ) и устойчивого разряда плазмы с большим уровнем тепловых и корпускулярных потоков на приемные устройства, исследование процессов формирования и устойчивого поддержания различных конфигураций плазмы и процессов, и параметров плазмы в пристеночной и диверторной областях, а также широкий круг других материаловедческих и плазмофизических задач. Следовательно, достижение параметров плазмы требуемых значений, таких как температура, интенсивность потоков частиц и тепловых потоков из плазмы, а также создание устойчивого разряда в течение достаточно длительного времени, порядка 5 секунд, является определяющим условием для проводимых на КТМ экспериментов. Решение данных задач невозможно осуществить без использования методов активного управления параметрами плазмы [9].

Сложность задачи разработки СУП определяется тем, что ее решение зависит от многих факторов, таких как параметры электромагнит-



ной системы ТОКАМАКа, его геометрия, состав и тип источников дополнительного нагрева плазмы, состав диагностического комплекса ТОКАМАКа и др. Анализ публикаций по системам управления плазмой действующих ТОКАМАКов показывает, что общим подходом в этом вопросе является разработка СУП с позиции управления плазмой как многосвязным объектом [5, 6]. При этом эффективность работы СУП зависит от того, насколько полно учтена взаимосвязь управляемых параметров в используемых в системе алгоритмах управления и моделях.

Проектируемая СУП должна обеспечить управление током плазмы, управление положением (равновесием) плазменного шнура по вертикали, управление формой плазмы, управление плотностью плазмы и вводом ВЧ-мощности в плазму. В качестве основных управляемых параметров могут быть использованы следующие: общий ток плазмы  $I_p$  [МА], форма плазменного шнура  $\Gamma(R, z)$ , положение плазмы в объеме камеры по вертикали  $z$ , см, плотность плазмы  $n_e$ , частиц/м<sup>3</sup>, энергосодержание плазмы  $W_p$ , МДж/м<sup>3</sup>. Здесь  $R$  и  $z$  – принятое обозначение координат в плоскости поперечного сечения рабочей камеры. Рассмотрим подробнее задачи управления параметрами плазмы.

Плазменный разряд инициируется и затем поддерживается путём управляемого изменения тока  $I_{CS}$  в обмотке омического нагрева (ОН) или индукторе. Отработка этой зависимости в СУП приводит к пробую рабочего газа в центре камеры КТМ, росту тока плазмы до заданного значения  $I_p = 0,75$  МА и его поддержанию в течение 5 с на постоянном уровне. Важно отметить, что отработка зависимости  $I_{CS}(t)$  в режиме логико-программного управления в данном случае неприемлема, поскольку параметры индуктивности  $L_i$  и проводимости  $\sigma_p$  плазмы, определяющие эффективность процесса трансформации энергии индуктора в плазму, в течение разряда постоянно изменяются. Поэтому СУП должна вести постоянный контроль величины  $I_p$  и корректировать зависимость  $I_{OH}(t)$ .

С точки зрения управления равновесием плазмы стабилизация её положения по вертикали ( $z$ ) в объёме камеры ТОКАМАКа является наиболее сложной задачей, особенно для установок с сильно вытянутой  $D$ -образной формой поперечного сечения плазмы, к которым относятся и КТМ. В данном случае формируется плазма с вытянутостью  $k_x \approx 1,6 \dots 1,9$ . Численное моделирование динамики перемещений плазменного шнура в рабочей камере КТМ по вертикали показывает, что инкремент неустойчивости вертикальных перемещений плазменного шнура составляет величину  $\gamma \approx 300$  с<sup>-1</sup> с учётом стабилизирующего

влияния пассивных обмоток и оболочки рабочей камеры ТОКАМАКа [10]. Следовательно, для подавления вертикальной неустойчивости плазмы в КТМ СУП должна выполнять активную стабилизацию возмущений с циклом управления  $\leq 0,3$  мс. Для формирования стабилизирующего воздействия на плазму в КТМ используются полоидальные обмотки НФС+ и НФС–, включенные последовательно в цепь питания быстродействующего управляемого инвертора тока, обеспечивающего требуемую динамику изменения тока  $I_{НФС}$  в этих обмотках. Контроль положения плазмы при этом осуществляется с помощью двухкомпонентных магнитных зондов, формирующих сигнал, пропорциональный величине перемещения плазмы по вертикали (координате  $z$ ).

Задача управления формой плазмы  $\Gamma(R, z)$  является особенно важной в КТМ, поскольку её решение направлено на создание специальных плазменных конфигураций: лимитерной, диверторной, с различными параметрами вытянутости ( $k_x$ ) и треугольности ( $\delta$ ), обеспечивающих требуемые уровни воздействий на внутрикамерные элементы КТМ. Для решения данной задачи в электромагнитной системе КТМ имеется восемь обмоток управления полоидальным полем  $PF1...PF8$ . Токи  $I_{PF}$  в них изменяются с помощью однополярных управляемых тиристорных выпрямителей. Зависимости  $I_{PF_i}(t)$ , аналогично зависимости  $I_{CS}(t)$ , рассчитываются до начала разряда, исходя из условий достижения требуемой плазменной конфигурации  $\Gamma^*(R, z)$ . Но в процессе плазменного разряда реальная форма плазмы отклоняется от требуемой за счёт естественных неустойчивостей, включая вертикальные перемещения плазмы, отмеченные выше. Поэтому СУП должна непрерывно отслеживать параметры конфигурации плазмы ТОКАМАКа на основе данных о текущем состоянии параметров полоидального магнитного поля (потока  $\Psi_p(R, z)$  и составляющих напряжённости магнитного поля  $B_\tau$  и  $B_n$ ) в 2-х сечениях камеры КТМ и корректировать зависимости  $I_{PF_1}(t)...I_{PF_8}(t)$  таким образом, чтобы конфигурация плазмы соответствовала требованиям эксперимента. Характеристики полоидального магнитного поля в каждый момент времени измеряются с помощью набора датчиков электромагнитной диагностики – 20-ти петель  $U_p$ , формирующих сигнал, пропорциональный производной потока  $\Psi_p$ , и 64-х двухкомпонентных зондов, установленных в 2-х сечениях тора по 32 шт. в каждом и формирующих величины тангенциальной ( $B_\tau$ ) и нормальной ( $B_n$ ) составляющих полоидального магнитного поля. При этом для более точного определения положения плазмы в объёме камеры используется зондирование рабочего пространства с помощью радар-рефлектометра.

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

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

На основании рассмотренного можно сделать вывод о невозможности решения названных задач автоматизированного управления на основе автономных контуров регулирования. Контур управления в СУП должны работать взаимосвязано как по электротехническим, так и по плазмофизическим параметрам ТОКАМАКа. При этом изменения токов  $I_{CS}(t)$ ,  $I_{HFC}$  и  $I_{PFI}(t)$  в соответствующих обмотках управления должно выполняться на основе математической модели ТОКАМАКа, описывающей взаимовлияние токовых контуров обмоток ЭМС, рабочей камеры ТОКАМАКа и самой плазмы. А с учетом возмущений, которые

естественно возникают в плазме в процессе ее эволюции за счет случайных изменений плотности  $n_e$ , изменений энергосодержания плазмы в момент ввода в нее ВЧ-энергии, наличия МГД-процессов, в СУП должны быть использованы модели, описывающие внутренние процессы в плазме, построенные на основе уравнений энергетического и материального балансов, а также уравнений магнитной гидродинамики [9].

Основываясь на анализе задач СУП, анализе проектных характеристик КТМ, его технологических систем, в частности, электромагнитной системы, системы напуска рабочих газов, системы дополнительного нагрева плазмы на гармониках ИЦР, а также комплекса диагностических систем, была предложена структурно-функциональная схема СУП, приведенная на рис. 1.1.1. Согласно данной схеме первичная информация в СУП поступает с датчиков электромагнитной диагностики – поясов Роговского, двухкомпонентных магнитных зондов, измерительных петель, петель  $U_p$  и диамагнитных катушек, а также с одноканального интерферометра и радар-рефлектометра, предназначенных для измерения профиля электронной плотности и положения плазменного шнура в объеме рабочей камеры соответственно [6]. В общей структуре СУП функционально выделяются следующие контуры управления: ток плазмы  $I_p$ , положение плазмы  $z$ , форма плазмы  $\Gamma(R, z)$ , стабилизация тока  $I_{TF}$  в обмотке тороидального поля, логико-программное управление ИЦР-нагрева плазмы и плотности плазмы  $n_e$ . Управляющие воздействия в первых четырех случаях формируются в микропроцессорных контроллерах и реализуются с помощью управляемых тиристорных источников питания и соответствующих обмоток ЭМС. Каждый из контроллеров использует для реализации алгоритма управления информацию, поступающую от диагностических систем, с датчиков токов и напряжений в обмотках ЭМС и от ЭВМ управления разрядом, которая обеспечивает согласованное функционирование контуров управления и выполняет общее управление и координацию работы всех контуров СУП, участвующих в процессе создания плазмы и поддержания ее параметров. При этом выделяется четыре фазы: создание плазмы путем быстрого переключения тока в обмотке ОН; омический разогрев плазмы; дополнительный разогрев; плавный вывод энергии из плазмы и прекращение разряда. Последняя фаза состоит из последовательности операций, инициируемых ЭВМ управляющей разрядом: отключение источников ВЧ-нагрева плазмы, снижение плотности плазмы, вывод токов из обмоток ЭМС.

Помимо управления фазами разряда, которое является, главным образом, логико-программным, ЭВМ управления разрядом выполняет

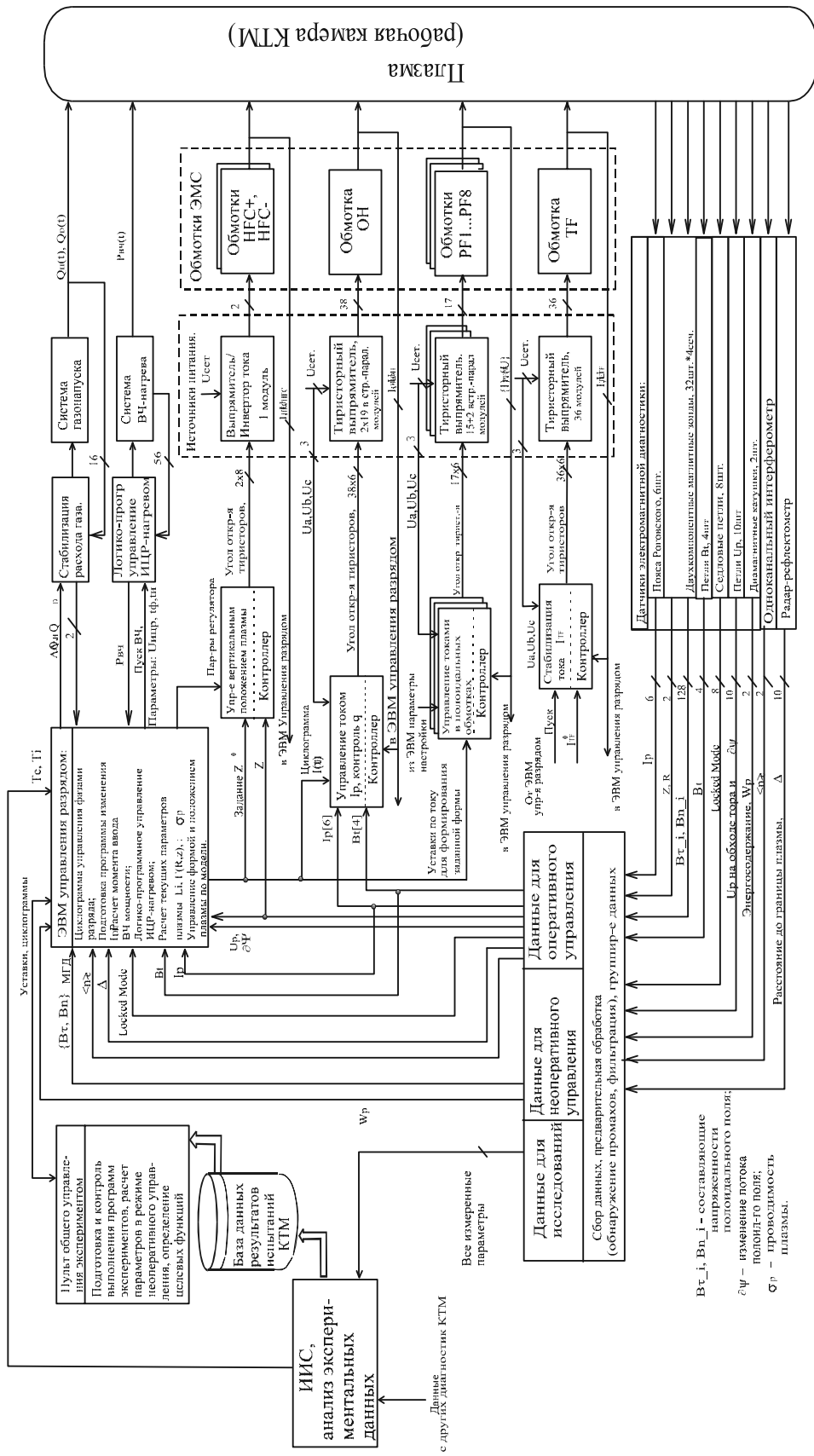


Рис. 1.1.1. Структурная схема системы управления плазмой КТМ

расчет уставок для всех контуров управления на основе модели плазменного процесса ТОКАМАКа и их коррекцию в соответствии с текущими параметрами плазмы, информация о которых также поступает в нее от систем диагностики.

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

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

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

### ***1.1.1. Контур управления положением и формой плазмы***

Наиболее критичными параметрами, подлежащими управлению, являются положение и форма плазменного шнура. В настоящее время наблюдается прогресс в данной области, сопровождающийся появлением значительного количества публикаций. Работы, в основном, выполнены на крупных исследовательских установках с вытянутым сечением плазмы, а именно: TCV, DIII-D, JET, Jt-60, CMOD. Особенностью данных контуров является то, что параметры, подлежащие управлению, не могут быть измерены непосредственно, то есть для определения формы и положения плазменного шнура необходимо произвести

достаточно сложную обработку диагностических данных с большого количества датчиков. Следует отметить, что теоретические изыскания по методам определения формы и положения плазменного шнура были выполнены в начале 70-х годов, однако, их применение для управления в реальном масштабе времени стало возможным лишь в последнее время, благодаря прогрессу в области цифровых систем. Кроме этого, необходимость указанных работ обусловлена переходом к вытянутому сечению плазмы, так как управление плазменным шнуром круглого сечения не требует сложных моделей плазмы, что было успешно реализовано, к примеру, на установке Tore-supra, где было достигнуто время разряда около 1 мин [3].

Отметим особенности функционирования контуров управления положением и формой в течение различных фаз разряда. В течение фазы роста тока плазменный шнур смещается от места возникновения — наружного обхода — к геометрическому центру вакуумной камеры. Изменение формы плазменного шнура осуществляется только после того, как положение плазменного шнура будет стабилизировано, т. е. фактически только в фазе 4. Остановимся подробнее на работе контура управления положением в течение 4-й фазы.

Переход к более сложным магнитным конфигурациям типа дивертор и двойной дивертор потребовал применения более сложных схем управления плазмой. На первых установках с круглым сечением и лимитерной конфигурацией плазменного шнура управление осуществлялось по четырем зазорам между границей плазмы и стенкой камеры, и этого было вполне достаточно. Для современных установок требуется гораздо большее количество параметров, особенно когда речь идет об управлении формой плазмы.

В настоящее время существует несколько подходов к управлению формой сложных магнитных конфигураций. Простейшим из них является метод управления расстоянием между плазмой и первой стенкой. Он с достаточной точностью описывает форму сечения плазменного шнура в текущий момент времени. Модифицированный простейший алгоритм называется «Isoflux», он используется на многих современных установках по УТС [4]. Данный метод используется при выполнении в реальном масштабе времени (РМВ) кода rtefit, который позволяет с высокой точностью рассчитать значения магнитного потока. Управление формой осуществляется по следующей схеме: на границе плазмы выбираются специальные контрольные точки, которые могут в достаточной мере охарактеризовать форму данной границы. Здесь имеется в виду же-

лаемая форма, задаваемая координатами контрольных точек. Алгоритм Isoflux подразумевает равенство магнитных потоков во всех контрольных точках. Для того, чтобы контрольные точки принадлежали границе плазмы или крайней замкнутой магнитной поверхности, магнитный поток в контрольных точках должен быть равен магнитному потоку на границе плазмы (рис. 1.1.2). Следовательно, необходимо определить магнитный поток хотя бы в одной опорной точке, гарантированно принадлежащей крайней магнитной поверхности плазменного тора. В случае диверторной конфигурации такой точкой является  $X$ -точка. Рассчитать  $X$ -точку можно из условия равенства нулю полоидального магнитного поля. В случае лимитерной конфигурации в качестве опорной выбирается точка касания плазмой диафрагмы.

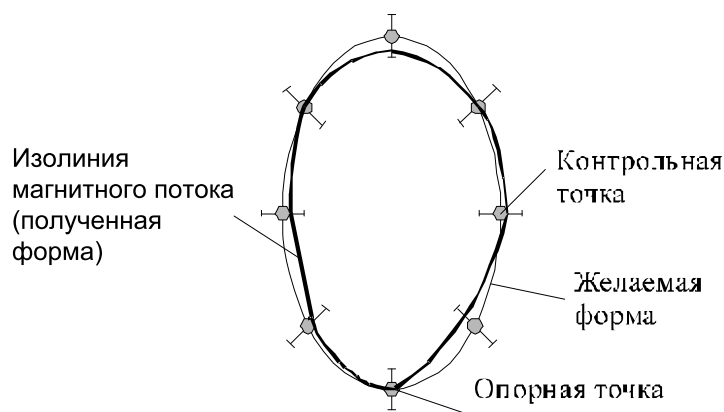


Рис. 1.1.2. Пример магнитной конфигурации плазмы

По имеющимся данным в настоящее время разработана и успешно применяется усовершенствованная схема на основе алгоритма Isoflux [5, 6]. Данный алгоритм носит название «ММО» (от английского Multi Input Multi Output), он основан на анализе множества параметров плазмы и формировании множества управляющих воздействий.

Данный алгоритм предполагает использование в контуре управления модели плазмы, учитывающей многосвязность объекта управления. Следует отметить, что описанные выше алгоритмы работоспособны только на фазе плато тока и при относительно стабильных параметрах плазмы. В современной литературе не упоминается экспериментов с постоянным управлением формой плазменного шнура в течение всего разряда от инициации до гашения плазменного шнура.

Все отмеченное выше актуально только для сложных магнитных конфигураций, характерных для современных установок и КТМ в том числе. На начальных этапах функционирования КТМ при лимитерных конфигурациях плазмы могут быть использованы более простые методы.



#### 1.1.1.1. Структурная схема контура.

Алгоритм управления положением и формой плазмы.

Алгоритм расчета добавок токов коррекции в обмотках ЭМС

Исходя из анализа современных подходов к управлению формой плазмы, разработана структурная схема контура, представленная на рис. 1.1.3. В основе предлагаемого алгоритма лежит подход, аналогичный идеологии алгоритмов Isoflux и MIMO.

Рассмотрим основные блоки данной схемы. Блок расчета сценария изменения формы плазмы в предстоящем разряде. Блок необходим для задания уставок системе управления плазмой с учётом существующих аппаратных ограничений СУП. Расчет сценария разряда производится в предпусковом режиме. Результатом данного расчета являются набор контрольных точек в каждый момент времени разряда. Для реализации данного блока могут быть использованы уже разработанные и зарекомендовавшие себя коды, например программы EFIT, DINA, TRANSMAX и т. п.

Блок формирования координат контрольных точек предназначен для задания границы плазмы в виде координат точек  $\Gamma(R_i, Z_i, t)$  в процессе разряда. Изменение набора координат должно быть согласовано с текущей фазой разряда и осуществляться в течение разряда как по достижению определенных моментов времени, так и по достижению определенных значений параметров, и, в конечном итоге, должно определять эволюцию плазмы.

Блок расчета текущей формы плазмы представляет программный код (алгоритм), позволяющий на основе диагностических данных в реальном масштабе времени рассчитывать электромагнитную конфигурацию КТМ в виде распределений потока  $\Psi$  и полоидального поля  $B_p$ .

В качестве такого кода может быть использован rtEFIT либо другой подобный код. Рассчитанные распределения  $\Psi$  и  $B_p$  позволят определить положение опорной точки, разница потоков в которой с потоками в контрольных точках определит рассогласование, подлежащее отработке системой управления формой плазмы. Задача управления формой, таким образом, сводится к минимизации отклонений потоков в контрольных точках от потока в опорной точке.

Расчет сценария положения плазмы также выполняется вне времени разряда на основе определенной численной модели. Причем, расчет должен быть согласован с расчетом сценария формы плазмы, и может выполняться теми же численными кодами. Блок расчета текущего вертикального положения, в зависимости от используемой схемы из-

мерений, реализует расчет на основе диагностических данных. В простейшем случае – это определение разности показаний пар тангенциальных зондов. В случае использования более точных алгоритмов – сложение показаний большого количества датчиков (зондов, петель) с весовыми коэффициентами.

Для формирования управляющих воздействий необходимо рассчитать добавки токов  $\Delta I_{pfj}$  в катушках управления формой.

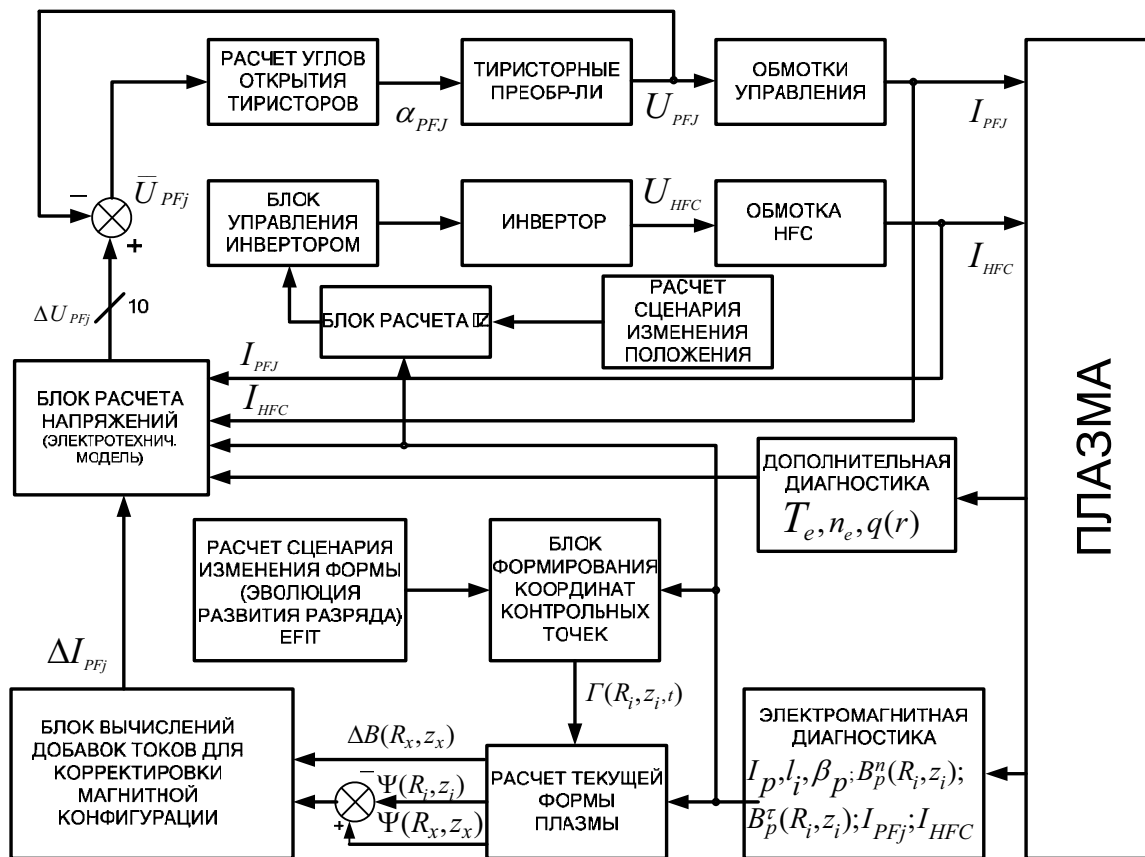


Рис. 1.1.3. Структурная схема контура управления формой и положением плазмы ТОКАМАКа КТМ

Данную задачу выполняет блок расчета добавок токов, который, по своей сути, является оптимальным регулятором. Алгоритм расчета основан на использовании двух уравнений:

- а) уравнении равновесия плазмы с учетом магнитных полей внешних источников:

$$\frac{\partial^2 \psi_0}{\partial r^2} - \frac{1}{r} \frac{\partial \psi_0}{\partial r} + \frac{\partial^2 \psi_0}{\partial z^2} = -\frac{8\pi^2}{c} r \left( 2\pi cr \frac{dp(\psi_0 + \psi_{pf})}{d\psi} + \frac{2F(\psi_0 + \psi_{pf})}{cr} \frac{dF(\psi_0 + \psi_{pf})}{d\psi} \right); \quad (1.1.1)$$

б) уравнении связи для токов в обмотках полоидального поля PF:

$$\frac{\partial^2 \psi_{pf}}{\partial r^2} - \frac{1}{r} \frac{\partial \psi_{pf}}{\partial r} + \frac{\partial^2 \psi_{pf}}{\partial z^2} = -\frac{8\pi^2}{c} r \left( \sum_{i=1}^m I_{pf_i} \delta(r_{0i} - r) \delta(z_{0i} - z) \right), \quad (1.1.2)$$

где  $\psi_0$ ,  $\psi_{pf}$  – поток полоидального магнитного поля, создаваемого током плазмы и токами в электромагнитных обмотках PF, соответственно;  $I_{PF}$  – ток в электромагнитной  $i$ -обмотке, создающей полоидальное магнитное поле.

Задача расчета добавок токов в обмотках PF по заданной границе плазмы сводится к нахождению таких токов  $I_{pf}$  при которых решение (1.1.1) удовлетворяло бы условию:

$$(\psi_0 + \psi_{pf})_{\Gamma(r,z)} = \psi_{gr} = \text{const}, \quad (1.1.3)$$

где  $\Gamma(r, z)$  – граница плазмы. При этом должно выполняться условие:

$$\{(r_1, z_1), (r_2, z_2), (r_m, z_m)\} \in \Gamma(r, z), \quad (1.1.4)$$

где  $(r_i, z_i)$  – точки, определяющие форму – положение желаемой границы плазмы.

Добавочные токи в полоидальных обмотках могут быть найдены из условий компенсации отклонений потока, вызванных током плазмы и потоком, создаваемым обмотками PF. Данное условие записывается следующим образом:

$$\begin{aligned} \Delta \Psi_j &= \sum_{i=1}^n [F(r_i, z_i, r_j, z_j) \Delta I_i]; \\ F(r_i, z_i, r_j, z_j) &= \frac{4\pi}{c} \sqrt{\frac{r_i r_j}{k^2}} [(2 - k^2)K(k) - 2E(k)]; \\ k &= \frac{4r_i r_j}{[(r_i + r_j)^2 + (z_i - z_j)^2]}, \end{aligned} \quad (1.1.5)$$

где  $n$  – количество обмоток полоидального поля;  $i$  – номер полоидального тока;  $j$  – номер точки в которой восстановлен поток;  $\Delta I$  – добавка к полоидальному току;  $F$  – функция потока единичного кольцевого тока;  $K$ ,  $E$  – полные эллиптические интегралы второго рода.

Токовые добавки могут быть найдены из условия минимизации следующего функционала:

$$\sum_{j=1}^m (\Delta \Psi_j - \sum_{i=1}^n [F(r_i, z_i, r_j, z_j) \Delta I_i])^2 \rightarrow \min, \quad (1.1.6)$$

где  $m$  – количество используемых датчиков;  $n$  – количество обмоток полоидального поля.

Поскольку исполнительными механизмами системы управления формой являются тиристорные источники питания обмоток ЭМС, и выходным параметром данных источников является напряжение, необходимо пересчитать полученные добавки токов в добавки напряжения. Сложность данной задачи в том, что совокупность всех обмоток и плазменного шнура представляет индуктивно-связанную электротехническую систему. Блок расчета напряжений предназначен для расчета добавочных напряжений с учетом индуктивности и взаимоиндуктивности нагрузки. Данный блок реализует электротехническую модель ТО-КАМАКа. Основные соотношения для этой модели приведены ниже:

$$\frac{d}{dt}(L_p I_p) + \sum_i^{N_{PF}} \frac{d}{dt}(M_{pi} I_i) + \sum_k^{Next} \frac{d}{dt}(M_{pk} I_k) + R_p I_p = 0; \quad (1.1.7)$$

$$L_i \frac{dI_i}{dt} + \frac{d}{dt}(M_{pi} I_p) + \sum_j^{N_{PF}-1} M_{ij} \frac{dI_j}{dt} + \sum_k^{Next} M_{ik} \frac{dI_k}{dt} + R_i I_i = U_i; \quad (1.1.8)$$

$$L_i \frac{dI_i}{dt} + \frac{d}{dt}(M_{pi} I_p) + \sum_j^{N_{PF}-1} M_{ij} \frac{dI_j}{dt} + \sum_k^{Next} M_{ik} \frac{dI_k}{dt} + R_i I_i = U_i, \quad (1.1.9)$$

где уравнение (1.1.7) – для плазменного витка, (1.1.8) – для полоидальной  $i$ -катушки с источником питания, (1.1.9) – для внешнего конструктивного  $k$ -элемента, в котором наводятся вихревые токи (например вакуумная камера, витки пассивной стабилизации, и т. п.);  $R_p$  – сопротивление плазмы, которое определяется из диагностических данных, на основании измерений тока плазмы и напряжения на обходе тора. Электропроводность плазмы при полностью ионизированной плазме с однозарядными ионами (водородная плазма)  $\sigma_E \approx 10^7 T_e^{3/2} (CGSE)$ . Проводимость не зависит от плотности плазмы и быстро возрастает с увеличением  $T_e$ . Присутствие многозарядных ионов значительно снижает

электропроводность плазмы  $\sigma_E \approx 10^7 \frac{\sum a_k Z_k}{\sum a_k Z_k^2} T_e^{3/2}$ , где  $a_k$  – относитель-

ная концентрация ионов с зарядом  $Z_k$ . Таким образом, зная распределение электронной температуры по сечению плазменного шнура, можно определить распределение проводимости, а следовательно, и тока по сечению шнура;  $L_p$  – индуктивность плазмы, которая может быть определена при известном распределении плотности тока по сечению плазменного шнура как  $L_p = 4\pi \int_{S_{\Omega_p}} \psi_p^* j_p^* dS$ , где знаком (\*) обозначены поло-

идальный поток и плотность тока по сечению, соответствующие единичным полным токам. В то же время величина внутренней индуктивности на единицу длины плазменного витка  $l_i$  может быть определена из диагностических данных в виде  $\frac{l_i}{2} + \beta_p$ , а отношение газокINETического давления плазмы к давлению полоидального магнитного поля  $\beta_p$  может быть определено из измерений диамагнитного эффекта;  $\tau_k$  – постоянная времени затухания вихревого тока.

Распределение газокINETического давления по сечению плазменного шнура пропорционально произведению  $n_e(r)$  и  $T_e(r)$ . Эта информация позволяет уточнить распределение плотности тока по сечению шнура.

В результате рассчитанные напряжения подаются в виде уставок на вход системы управления источников питания, где по известной градуировочной характеристике тиристорного преобразователя уставка пересчитывается в угол открытия тириستоров. Рассчитанные напряжения стабилизируются локальными контурами управления.

### 1.1.1.2. Определение параметров плазмы по данным электромагнитной диагностики

Определение параметров плазмы, используемых в контурах управления, осуществляется на основе данных, получаемых в том числе и с электромагнитной диагностики (ЭМД). Ввиду того, что ТОКАМАК является установкой с магнитным удержанием, результаты измерения токов, напряжённостей и потоков магнитных полей являются основными данными для определения параметров плазменного шнура. На рис. 1.1.4 изображена схема взаимосвязей параметров плазмы, измеряемых электромагнитной диагностикой. В соответствии с этим рисунком отметим, что данные с датчиков электромагнитной диагностики используются практически во всех контурах управления КТМ.

Электромагнитная диагностика позволяет определить следующие параметры плазмы:

- индукция полоидального магнитного поля  $B_p$ ;
- положение плазменного шнура  $\Delta Z$ ;
- ток плазмы  $I_p$ ;
- напряжение на обходе плазменного шнура  $U_p$ ;
- вертикальный магнитный поток  $\psi_{\perp}$ ;
- форма поперечного сечения плазменного тора  $\Gamma(R, z)$ ;

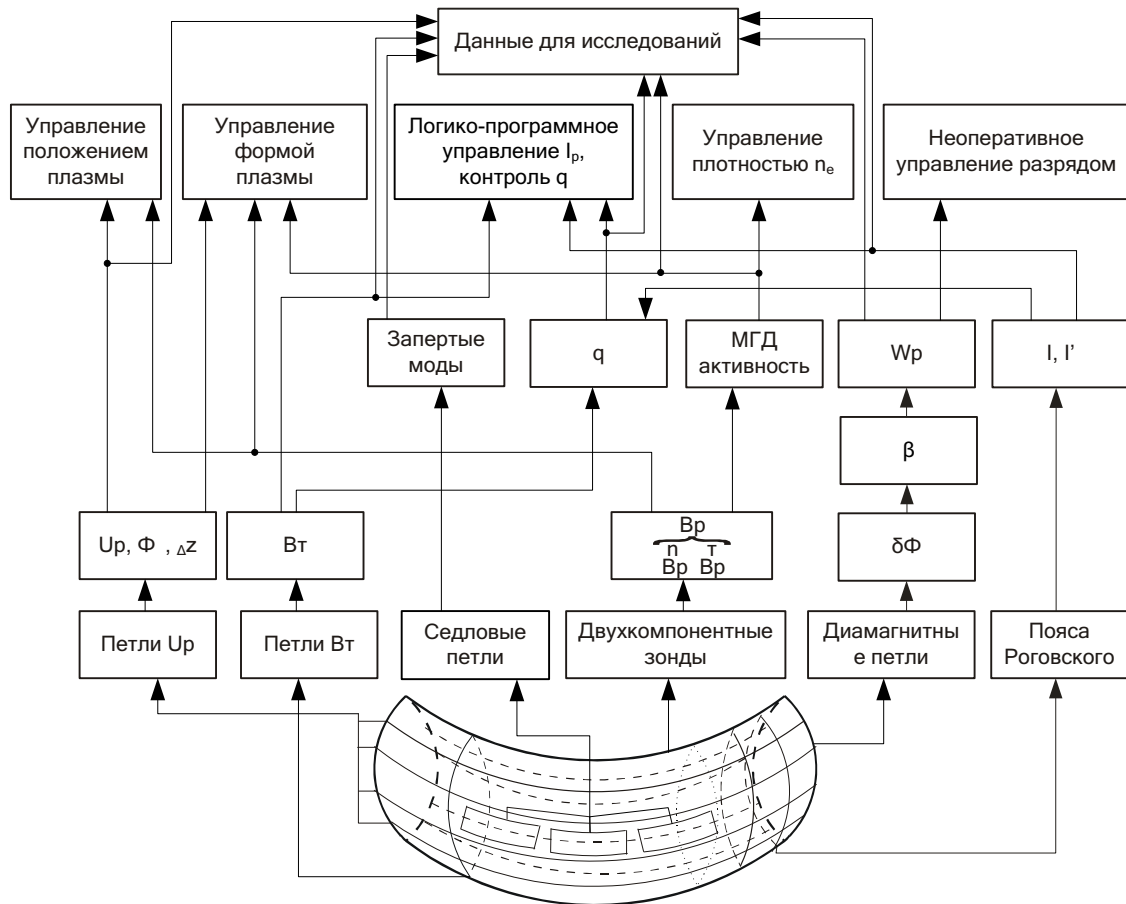


Рис. 1.1.4. Схема взаимосвязей измеряемых параметров

- диамагнитный поток  $\delta\Phi$ ;
- энергосодержание плазменного шнура  $W_p$ ;
- $\beta$ -параметр плазмы;
- внутреннюю и полную индуктивность плазменного шнура  $L_p$ ;
- мощность омического нагрева  $P_{OH}$ ;
- запас устойчивости  $q$ ;
- характер МГД активности ( $B^-$ -параметр);
- индукция тороидального магнитного поля.

Рассмотрим некоторые особенности, присущие электромагнитной диагностике в целом. Электромагнитная диагностика состоит из большого количества независимых измерительных каналов, имеющих различные характеристики. В виду того, что датчики электромагнитной диагностики детектируют большое количество сигналов, обусловленных различными процессами, проходящими в плазме (низкочастотные сигналы, обусловленные изменениями токов в обмотках и плазме, колебания Мирнова с частотой порядка 10 кГц, высокочастотные МГД процессы [12, 13]), выходные сигналы с датчиков имеют широкий

спектральный диапазон. Здесь следует отметить, что сигналы с большинства датчиков подсистемы электромагнитной диагностики являются производными измеряемых параметров. При этом важным является то, что нас интересует как сам параметр, так и его производная. Учитывая отмеченное, а также существенный уровень помех, возникающих в измерительном сигнале за счет наличия мощных электромагнитных, радиационных и тепловых полей, характерных для таких установок, предварительная обработка сигналов с датчиков электромагнитной диагностики должна включать их фильтрацию и интегрирование. Как показал проведенный анализ, на большинстве установок подобного типа [8, 16, 34] предварительная обработка осуществляется в аналоговом виде, т. е. с использованием аналоговых фильтров и интеграторов. Для аналогового интегратора ошибку интегрирования можно записать в следующем виде:  $\frac{t^2}{2 \cdot R^2 \cdot C^2}$ , где  $t$  – длительность процесса;  $RC$  – постоянная времени интегрирования. Из данного выражения следует, что увеличение точности интегрирования приводит к росту постоянной времени интегратора, что в свою очередь снижает динамические характеристики измерительного канала. К примеру, для обеспечения погрешности интегрирования сигнала с пояса Роговского  $< 1\%$  постоянная времени интегрирования должна быть порядка  $10^3$  с, при динамике изменения тока плазмы порядка 10 кГц. Использование интегратора с такой постоянной времени неприемлемо для контуров управления. Для разрешения указанного противоречия был рассмотрен вариант использования в структуре измерительных каналов цифровых интеграторов. Точностные и динамические характеристики измерительного канала в случае использования цифрового интегрирования будут определяться характеристиками аналого-цифрового преобразователя (АЦП). И если учесть, что использование аналогового интегратора не избавит от использования в составе измерительного канала АЦП, цифровое интегрирование дает очевидные преимущества.

Необходимость фильтрации сигналов с датчиков ЭМД упоминалась ранее. Проведенный анализ показал, что источниками помех являются: во-первых, внешние электромагнитные поля, т. е. поля, воздействующие на линию связи, во вторых, поля, воздействующие непосредственно на датчик. Источниками помех первого вида чаще всего являются мощные источники питания обмоток полоидального и в особенности тороидального полей. Данные помехи носят импульсный характер. Источников помех второго вида может оказаться очень много: это

могут быть поля, создаваемые наведенными в элементах конструкции вакуумной камеры токами, неточности в установке датчиков, влияния разных компонент полей (в случае измерения определенной компоненты). Характер данных помех оценить на данном этапе сложно, можно лишь отметить, что их амплитуда, по сравнению с помехами первого вида, будет значительно меньше. Использование в измерительных каналах электромагнитной диагностики аналоговых фильтров может привести к противоречию, схожему со случаем использования аналоговых интеграторов, а именно: стремление увеличить порядок и, соответственно, качество фильтра приводит к увеличению фазового сдвига, что недопустимо из-за жестких требований к динамическим характеристикам измерительных каналов, информация с которых используется для управления плазмой в реальном масштабе времени. Гибкость алгоритмов цифровой фильтрации дает очевидное преимущество в случае отсутствия точной информации о характеристиках сигналов и шумов. Проведенный анализ показал, что использование цифровых средств предварительной обработки в измерительных каналах электромагнитной диагностики позволит улучшить их динамические характеристики, а так же характеристики точности и надежности измерений [37]. Исходя из предъявленных требований, была предложена структурная схема подсистемы сбора данных с электромагнитной диагностики (рис. 1.1.5). Использование в составе подсистемы VME оборудования продиктовано следующим: обеспечение высокой пропускной способности и производительности подсистемы, обеспечение высокой надежности и помехозащищенности, обеспечение проведения обработки сигналов в реальном масштабе времени. Предлагаемое техническое решение позволит осуществить сбор первичной информации с датчиков, ее обработку и передачу на верхние иерархические уровни информационно-измерительной системы и в систему управления плазмой. Рассмотрим особенности получения, обработки, интерпретации и использования данных с датчиков электромагнитной диагностики.

#### *1.1.1.2.1. Измерение индукции полоидального магнитного поля*

Двухкомпонентные зонды предназначены для измерения двух составляющих индукции полоидального магнитного поля — тангенциальной ( $B_{\tau}$ ) и нормальной ( $B_n$ ). Данные измерения имеют основополагающее значение, поскольку фактически все соотношения в описанных ниже алгоритмах реконструкции формы и определения положения плаз-



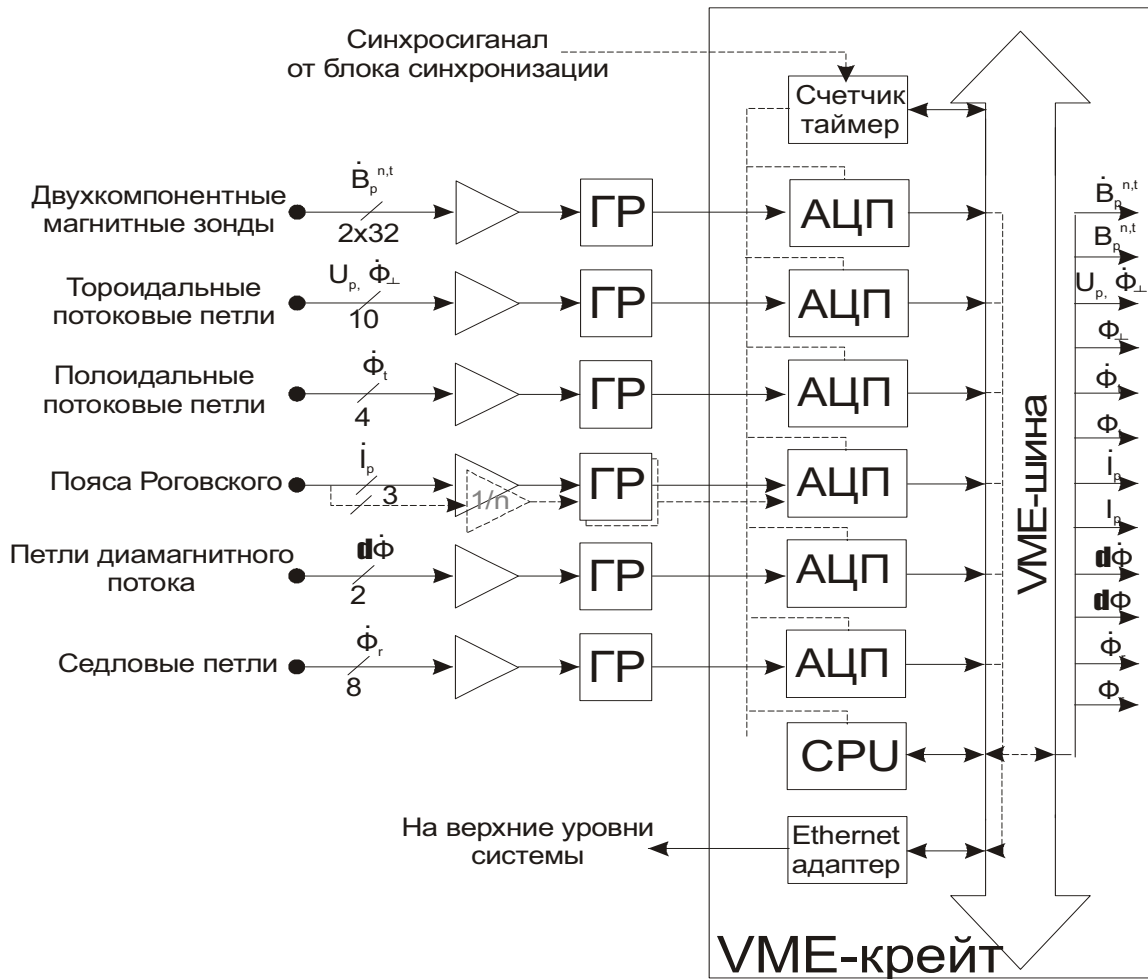


Рис. 1.1.5. Структурная схема электромагнитной диагностики

мы записаны с использованием величин  $B_r$  и  $B_n$ . Помимо применения в СУП, данные, полученные с двухкомпонентных зондов, используются в других исследованиях, поскольку позволяют определять параметры МГД активности плазмы. В соответствии с техническим проектом КТМ, предусматривается установка 32-х двухкомпонентных зондов в двух сечениях камеры. Таким образом, количество измерительных каналов будет составлять 128. Динамический диапазон сигналов двухкомпонентных зондов, как отмечалось ранее, достаточно широк. Структура измерительных каналов показана на рис. 2.1.4. Метрологические характеристики измерительных каналов приведены в табл. 1.1.3.

При использовании данных с двухкомпонентных зондов для реконструкции формы плазмы предъявляются жесткие требования, к точности углов установки зондов по отношению к оси ТОКАМАКа. От этого существенно зависит точность реконструкции формы плазмы. Также неточности установки датчиков могут привести к тому, что на

них будет влиять поле, создаваемое торроидальными обмотками КТМ, что в свою очередь может привести к полному искажению экспериментальных данных.

Для определения требований к точности установки зондов с точки зрения восстановления формы были проведены вычислительные эксперименты. Эксперименты заключались в расчёте показаний датчиков от двух токовых нитей, моделирующих плазму, при различной точности в определении углов установки датчиков. При расчёте в углы вносилась погрешность с нормальным законом распределения со средними значениями от 1 до 10°. Результаты вычислительных экспериментов приведены в табл. 1.1.1. Анализ результатов показывает, что неточность в позиционировании датчика в 1° приводит к погрешности в определении составляющей поля, равной 3%. Влияние данной погрешности на точность определения формы плазмы на данный момент не оценена, но, очевидно, будет значительно больше в виду некорректности задачи реконструкции формы.

Таблица 1.1.1

*Результаты численного эксперимента*

Средние погрешности, %													
Погрешность измерения $\delta$ , при реальных углах		Погрешности определения углов											
		$\pm 1^\circ$		$\pm 2^\circ$		$\pm 3^\circ$		$\pm 4^\circ$		$\pm 5^\circ$		$\pm 10^\circ$	
$\delta Br$	$\delta Bz$	$\delta Br$	$\delta Bz$	$\delta Br$	$\delta Bz$	$\delta Br$	$\delta Bz$	$\delta Br$	$\delta Bz$	$\delta Br$	$\delta Bz$	$\delta Br$	$\delta Bz$
2,77	2,58	2,73	2,57	2,17	1,87	3,73	3,27	1,87	1,62	4,78	5,02	4,69	5,22
		2,95	2,91	3,04	2,63	3,32	2,85	3,83	4,24	4,08	3,98	3,15	3,39
		2,46	2,46	2,72	2,7	2,86	2,9	3,84	3,38	2,33	2,51	8,59	9,06
		3,23	3,15	2,14	1,88	2,42	2,3	2,8	2,68	5,13	5,33	10,43	12,33
		3,12	2,98	3,65	3,72	2,34	2,39	4,83	4,97	5,13	5,74	5,73	5,81
		2,62	2,52	1,82	1,56	4,28	3,99	4,12	3,96	1,76	2,15	7,04	6,09
2,77	2,58	3,23	3,15	3,65	3,72	4,28	3,99	4,83	4,97	5,13	5,74	10,43	12,33

### 1.1.1.2.2. Измерение потока магнитного поля $\Psi$

Измерительные петли, называемые также петлями напряжения на обходе, потоковыми петлями, предназначены для измерения следующих параметров: напряжения на обходе камеры (сигнал, непосредственно снимаемый с датчика), вертикального магнитного потока (сиг-

нал, получаемый путём интегрирования сигнала с датчика). Кроме отмеченного, эти датчики могут использоваться для определения токов, наведённых на элементах вакуумной камеры. Данные, получаемые с измерительных петель, используются также в СУП.

Во многих случаях построение контуров управления положением и формой плазмы на основе показаний этих датчиков предпочтительней по ряду причин: требования к точности установки данных датчиков не столь жёсткие по сравнению с локальными датчиками (двухкомпонентными). В силу значительной удалённости датчиков друг от друга они не подвержены локальным ошибкам, связанным с возможной тороидальной асимметрией плазмы, изолинии магнитного потока повторяют геометрию электромагнитной конфигурации. Следует отметить, что при монтаже на вакуумной камере неизбежно возникнут трудности с размещением петель на ее поверхности, ввиду наличия патрубков и другого оборудования. Результирующий поток, измеряемый петлями, будет искажён, поскольку не все датчики будут иметь идеальную форму кольца. Данные искажения показаний датчиков могут быть скомпенсированы введением дополнительных весовых коэффициентов, учитывающих реальную геометрию петель. Для проверки влияния искажений формы петель на точность измерения магнитного потока, был проведён численный эксперимент, в котором измерительная петля, проходящая в меридиональном сечении, «обходит» десять патрубков. Результаты численного эксперимента представлены в табл. 1.1.2.

Таблица 1.1.2

*Результаты экспериментов*

	Нормированный поток	Коэффициент	Откорректированное значение
Идеальная петля	1	1	1
С «обходом»	1,933864916	0,5171	1,000002
Шум 1 %	1,937252449	0,5162	1,00001
Шум 2 %	1,939858245	0,5156	1,000191
Шум 3 %	1,947779862	0,5136	1,00038

Из анализа данных таблицы можно сделать вывод, что искажение формы петель оказывает существенное влияние на измеряемый поток, однако введением весовых коэффициентов можно фактически полностью компенсировать величину искажений. Следовательно, в отличие от двухкомпонентных зондов, неточность установки петель в виде ис-

кажения их формы может быть программно скорректирована. Кроме отмеченного, в составе датчиков ЭМД могут быть использованы, так называемые, секторные петли. В отличие от полных петель, секторные петли могут быть установлены на вакуумной камере таким образом, чтобы избежать «обхода» петель диагностического оборудования. При этом секторная петля остается распределенным датчиком и не подвержена локальным ошибкам. Структура измерительных каналов для рассматриваемых типов датчиков изображена на структурной схеме подсистемы сбора данных (рис. 1.1.5). Метрологические характеристики соответствующих измерительных каналов приведены в табл. 1.1.3.

### 1.1.1.2.3. Измерение положения плазмы

Определение положения плазмы по вертикали и горизонтали ( $\Delta z$  и  $\Delta R$ , соответственно) может быть выполнено на основании показаний различных наборов датчиков ЭМД. В простейшем случае может быть использована следующая схема измерений. Для расчёта положения плазмы используются показания с пары тангенциальных обмоток двухкомпонентных зондов, при этом отношение разности показаний датчиков к сумме будет пропорционально смещению. В данном случае имеется в виду положение крайней магнитной поверхности плазмы, а фактически данная схема показывает, насколько различается расстояние до граничной поверхности от верхнего и нижнего (левого и правого) зонда. Основным недостатком данной схемы измерения является значительная зависимость результатов измерения от формы плазменного шнура, в особенности от его вытянутости. Кроме того, данный метод может быть подвержен локальным ошибкам, обусловленным возможным наличием тороидальной асимметрии плазмы. Последнее ограничение можно обойти путём использования распределённых датчиков – измерительных петель (полных либо секторных). Кроме указанной выше, существует ещё ряд методов. Например, определение положения центроида тока – центра массы шнура. В соответствии с источником [17], на основе данных, полученных с датчиков измерительного контура вакуумной камеры, можно определить центр тока любой формы, протекающего внутри данного измерительного контура. Для определения положения центроида тока воспользуемся контурным интегралом Шафранова для мультипольных моментов тока:

$$Y_m = \frac{c}{4\pi J} \oint (f_m B_\tau + X g_m B_n) \partial l, \quad (1.1.10)$$

откуда при переходе к лабораторной системе координат, связанной с измерительным контуром, получаем

$$\Delta = \frac{c}{4\pi J} \oint (\xi B_r + z B_n) \delta l. \quad (1.1.11)$$

Данная методика свободна от недостатков разностного метода и может использоваться для плазменного шнура некруглой формы.

Указанная схема была успешно применена на JT-60 [29]. Выражение (1.1.11) для практического применения будет выглядеть следующим образом:

$$\begin{aligned} \Delta = & \sum_i [Cp_i + Dp_i(I_d / I_p)](Bp_i / I_p) + \\ & + \sum_i [C\omega_i + D\omega_i(I_d / I_p)](B\omega_i / I_p) + C_0, \end{aligned} \quad (1.1.12)$$

где  $I_d$  – ток в диверторной обмотке;  $Cp_i$ ,  $C\omega_i$ ,  $Pp_i$ ,  $D\omega_i$  – константы определяемые из статистического анализа базы данных магнитных конфигураций.

В данном методе могут быть использованы показания как двухкомпонентных зондов, так и зондов, и петель совместно. На установке TCV [8] данная методика реализована на основе показаний  $Bp$  зондов и находящихся на тех же полоидальных углах измерительных петель. Соотношение (1.1.11) при такой схеме измерения будет выглядеть следующим образом:

$$\Delta I_p = \sum_i z_i B_i \delta l_i + \sum_i \Delta \Psi_i \beta_i, \quad (1.1.13)$$

где  $z_i$ ,  $\delta l_i$  – координата и расстояния между датчиками;  $\beta_i$  – набор коэффициентов, минимизирующих влияние полоидальных обмоток на показания датчиков.

Кроме приведённых выше методов, может быть использована схема измерений на основе пояса Роговского с неравномерной намоткой витков – так называемые, синусоидальные и косинусоидальные катушки. Для реализации данного метода необходима также седловая петля. Однако, описаний успешного применения данного метода для определения положения плазмы с сильной вытянутостью в литературе не встречается. В основном, упоминается его применение для установок с круглым сечением плазменного шнура.

Следует также отметить, что те из описанных методов, которые непригодны для вытянутой плазмы, могут быть успешно применены при необходимости для определения горизонтального смещения  $\Delta R$  плазменного шнура в ТОКАМАКе КТМ.

Из проведённого анализа можно сделать вывод, что для использования в КТМ наиболее подходящим является метод на основе мультипольных моментов. На начальных этапах функционирования ТОКА-МАКа КТМ, когда номинальные параметры формы плазмы не будут реализованы, может быть использован один из простых методов, например разностный. Поскольку для определения положения используются те же самые датчики, что и для определения формы, метрологические характеристики и требования к измерительным каналам соответствующих параметров будут аналогичны.

#### *1.1.1.2.4. Измерение тока плазмы $I_p$*

Ток плазмы является одним из основополагающих параметров для СУП. Значения тока используется практически во всех контурах управления. В связи с этим, точное измерение тока плазмы является определяющим для эффективного функционирования СУП.

Для измерения тока плазмы в КТМ предусматривается установка трех поясов Роговского с равномерной намоткой. Сигнал, снимаемый с каждого датчика, пропорционален производной тока плазмы. Как и в случае с измерительными петлями, необходимо определять для целей управления как производную параметра, так и сам параметр. Сигнал с поясов характеризуется большим динамическим диапазоном, поскольку скорость изменения тока на этапе роста и плато сильно различается. Предварительные расчеты показывают, что если в момент роста тока, сигнал составляет единицы вольт, то на плато тока сигнал будет составлять десятки микровольт. В связи с чем, для обеспечения требуемой точности может быть использована регистрация сигнала с датчика по двум измерительным каналам. Структура измерительных каналов, приведена на рис. 1.1.5. Метрологические характеристики измерительных каналов приведены в табл. 1.1.3. Следует отметить, что уровни сигналов будут в значительной мере зависеть от конструкции датчиков и мест их расположения. Таким образом, структура измерительных каналов и характеристики устройств подсистемы сбора данных будет уточняться по мере определения конструкции датчиков ЭМД.

Необходимо отметить еще один важный аспект применения поясов Роговского. С помощью двух поясов Роговского, один из которых устанавливается внутри вакуумной камеры, а другой — снаружи, может быть измерен ток, протекающий по элементам конструкции вакуумной камеры. Учет данного тока при расчете положения и формы плазмы позволит увеличить точность определения этих параметров и, соответственно, повысить устойчивость контуров управления СУП.

### 1.1.1.2.5. Измерение индукции тороидального поля и диамагнитного потока

В соответствии с рис. 1.1.3, величина индукции тороидального поля  $B_T$  используется в контуре управления током плазмы. Для измерения данного параметра используются тороидальные измерительные витки. Поскольку тороидальное поле, создаваемое обмотками КТМ, в процессе разряда не меняется, датчики будут воспринимать изменения тороидального поля, обусловленные плазмой. Ввиду последнего сигнал с тороидальных витков будет иметь низкий уровень. Структура измерительных каналов данного параметра приведена на рис. 1.1.5. Метрологические характеристики приведены в табл. 1.1.3.

Измерение диамагнитного потока позволяет определить важный интегральный параметр плазмы  $\beta$  полоидальное ( $\beta_p$ ), который показывает отношения газокINETического давления плазмы к давлению магнитного поля. Диамагнитный поток связан с  $\beta$  следующим соотношением:

$$\beta = 1 + K_\beta \frac{b^2 B}{a^2 I} \delta\Phi, \quad (1.1.14)$$

где  $a$  – малый радиус плазмы;  $b$  – радиус измерительного контура.

Зная данный параметр, можно определить запас устойчивости на границе плазмы  $q$  и энергосодержание плазменного шнура. Величина запаса устойчивости  $q$  может использоваться для коррекции законов управления СУП с целью предотвращения срывов плазмы. Последний параметр используется в контуре управления энергосодержанием. Уравнение (1.1.15) определяет энергосодержание плазмы [15]:

$$W = K_w \cdot R_0 \cdot I^2 \cdot \beta_p. \quad (1.1.15)$$

Для измерения диамагнитного потока чаще всего используют две тороидальных катушки, одна из которых является компенсационной. Сигнал с этих датчиков также низкоуровневый. Структура измерительных каналов приведена на рис. 1.1.5. Метрологические характеристики приведены в табл. 1.1.3.

### 1.1.1.3. Алгоритм восстановления профиля сечения плазменного шнура

В настоящее время существует большое количество методов идентификации формы и положения плазменного шнура по данным электромагнитных измерений вне плазмы. Данная задача может быть разделена на две части: 1) решение однородного уравнения Грэда–Шафранова ( $\Gamma$ – $\Pi$ ) в вакуумной области, окружающей плазму, и определение границы плазмы; 2) решение полного уравнения  $\Gamma$ – $\Pi$  в области, зани-

маемой плазмой так, чтобы решение удовлетворяло однородному уравнению на границе плазмы. Данные задачи являются некорректными, т. е. небольшие изменения в данных на границе могут вызвать большие изменения в решении в небольшом удалении от границы. Некорректность можно обойти путем ограничения возможных распределений тока по сечению плазмы. Ниже приведена примерная классификация наиболее распространенных для установок типа ТОКАМАК методов. Решения задач восстановления профиля сечения плазмы условно можно разбить на три класса. Первый класс объединяет методы, использующие регрессионный анализ для сопоставления некоторого вектора диагностических данных с одним или несколькими параметрами плазмы.

Для реализации данного метода необходимо иметь базу данных распределений магнитного поля для рассматриваемой установки, в нашем случае ТОКАМАК КТМ, либо для подобной установки с введением масштабных коэффициентов.

Примерами таких методов являются метод параметризации функции [6] и метод использования нейронных сетей [7]. Второй класс алгоритмов, который можно отнести к алгоритмам конечноэлементного типа, использует конечный набор токовых нитей либо других токонесящих элементов для аппроксимации тороидального тока плазмы [2, 3, 5].

К этим методам относятся метод токовых нитей (фиксированных, подвижных) и метод потенциального слоя. Третий класс методов использует локальное разложение потоковой функции  $\Psi$  на измерительном контуре для экстраполяции в области границы плазмы.

Примерами данных методов являются метод разложения по тороидальным гармоникам, метод мультипольных моментов [9, 10] и метод локального разложения с использованием ряда Тейлора [4].

Остановимся на указанных методах подробнее. Как уже упоминалось, для успешной работы первого класса методов необходимо иметь базу данных магнитных конфигураций. Такая база данных формируется на основе результатов уже проведенных экспериментов и впоследствии пополняется результатами текущих экспериментов. На начальных этапах работы ТОКАМАКа, когда база еще не сформирована, используются либо другие методы определения положения и формы, либо базы данных с других установок, близких по конструкции с исследуемой. Преимуществом данного метода считается возможность его использования в реальном масштабе времени экспериментов и независимость от вытянутости плазменного шнура. Недостатком метода является необходимость существования достаточно большой базы данных экспериментов, от объема



Таблица 1.1.3

Перечень измерительных каналов параметров физических диагностик и их характеристики

№ п/п	Измеряемый параметр	Диапазон измерения	Динамическая характеристика, кГц	Допускаемая погрешность измерительного канала, %	Допускаемая погрешность определения параметра (функции), %	*	Система физической диагностики	Использ.				Число измерительных каналов
								у	ну	о	и	
1	Ток плазмы $I_p$	0...1		<1	<2,5	I	Электромагнитная	√		√	√	6
2	Производная тока плазмы $dI_p/dt$	0...2 МА 0...3 МА/с	1 10	<0,5	<0,5	I	Электромагнитная	√		√	√	
3	Положение плазмы по вертикали	$\Delta=0...20$ см	100	<1	<1	I	Электромагнитная	√		√	√	2
4	Форма плазмы $\beta_i + I_i/2$	$B_p=0...0,45$ Тл	100	<0,5	<5	I	Электромагнитная	√		√	√	64
5			100	<0,5	<5	I	Электромагнитная			√	√	
6	Locked mode	0...0,2 $B_p$	100	<1	<10	I	Электромагнитная		√	√	√	8
7	Энергосодержание плазмы, $W$	0...6 МВт	10	<1	<15	I	Электромагнитная		√	√	√	2
8	Напряж. на обходе, $U_p$	-200...30 В	100	<1	<1	I	Электромагнитная	√		√	√	20
9	Тороид-е поле, $B_t$	0...1 Тл	100	<1	<1	I	Электромагнитная	√		√	√	4
10	МГД-возмущения 2-ая МГД-мода, пилообразные колебания	0... 0,2 $B_p$	10000	<0,5	<10	II	МГД-диагностика				√	128

которой зависит точность метода. Кроме того, при появлении не типичной для существующего набора плазменных конфигураций ситуации, например при возникновении срыва, форма плазмы будет получена с большой погрешностью [11]. Методы, основанные на применении баз экспериментальных данных, широко освещались в литературе с появлением первых попыток управления формой плазмы, поскольку позволяли свести вычисление формы плазмы к определению небольшого количества ее геометрических параметров и были под силу имеющимся в то время техническим средствам. В настоящее время с появлением мощной вычислительной техники данные методы потеряли свою актуальность.

Второй класс методов является сейчас достаточно распространенным и может использоваться как для полного анализа равновесия плазмы, проводимого в послепусковом режиме с большой точностью, так и в режиме реального времени разряда с меньшей точностью для управления плазмой.

Разница в данном случае заключается в количестве элементов, представляющих тороидальный ток плазмы. Недостатком данного класса методов является его не универсальность, особенно в случае фиксированных элементов: его нельзя с одинаковой точностью использовать для различных конфигураций плазмы. Для корректного применения метода необходимо наличие априорной информации о форме распределения ввиду того, что токовые элементы должны находиться внутри объема плазмы. В случае диверторной конфигурации плазмы этот недостаток особенно критичен, поскольку в начале разряда плазма имеет круглое сечение и занимает достаточно небольшой объем вакуумной камеры. Рассмотрим метод подвижных токовых нитей, поскольку он является свободным от некоторых перечисленных недостатков.

Равновесие плазмы в сильном магнитном поле описывается системой уравнений идеальной магнитной гидродинамики:

$$\left\{ \begin{array}{l} \operatorname{rot} \vec{B} = \frac{4\pi}{c} \vec{j}_\varphi \\ \operatorname{div} B = 0 \\ \nabla p = \frac{1}{c} [\vec{j}_\varphi, \vec{B}] \end{array} \right. , \quad (1.1.16)$$

где  $p$  — газокINETическое давление плазмы;  $\vec{j}_\varphi$  — плотность тока в плазме (использована система единиц СГС). Система уравнений описывает равновесие реальной плазмы с медленно меняющимися во времени макроскопическими параметрами.

Для аксиально-симметричной задачи вышеуказанная система уравнений сводится к уравнению относительно потоковой функции  $\psi$ -уравнению Г–Ш [12]:

$$\Delta^* \psi = r^2 \operatorname{div} \left( \frac{\nabla \psi}{r^2} \right) = \frac{d^2 \psi}{dr^2} - \frac{1}{r} \frac{d\psi}{dr} + \frac{d^2 \psi}{dz^2} = -\frac{8\pi^2}{c} r j_\phi, \quad (1.1.17)$$

где

$$j_\phi(r, z) = 2\pi c r \frac{dp}{d\psi} + \frac{2F}{cr} \frac{dF}{d\psi} \quad (1.1.18)$$

— плотность тороидального тока плазмы;  $c$  — скорость света в вакууме;  $r, z$  — принятые обозначения координат в поперечном сечении камеры ТОКАМАКа. За точку отсчета по оси  $r$  принимается центр тора, по оси  $z$  центр обмоток тороидального поля.

В терминах потоковой функции  $\psi$  формулируется задача определения границы плазмы как крайней магнитной поверхности.

Для увязки параметров магнитного поля на границе, то есть диагностических данных с параметрами в сечении плазменного шнура, можно воспользоваться формулой Грина. Для произвольных функций  $u$  и  $v$  и для оператора Г–Ш  $\Delta^*$  записывается вторая формула Грина:

$$\int_{(S)} r^{-1} (u \Delta^* v - v \Delta^* u) dS = \oint_{(L)} r^{-1} \left( u \frac{dv}{dn} - v \frac{du}{dn} \right) dl, \quad (1.1.19)$$

где  $S$  — двумерная область в плоскости  $(r, z)$ , а  $L$  — гладкая граница этой области.

Используя последнюю формулу для двух произвольных функций  $u = \chi$  и  $v = \psi$ , удовлетворяющих уравнениям  $\Delta^* \chi = 0$  и  $\Delta^* \psi = -8\pi^2 / cr j_\phi$  можно получить следующее уравнение:

$$\int_{(S)} \chi j_\phi dS = \frac{c}{8\pi^2} \oint_{(L)} r^{-1} \left( \psi \frac{d\chi}{dn} - \chi \frac{d\psi}{dn} \right) dl. \quad (1.1.20)$$

Существует и другая форма представления этого тождества, более удобная для практического применения, когда вместо функций  $\psi$  и

$d\psi/dn$  используются функции нормальной  $B_n = \frac{1}{2\pi r} \frac{d\psi}{dn}$  и танген-

циальной  $B_\tau = -\frac{1}{2\pi r} \frac{d\psi}{dn}$  компонент полоидального магнитного поля:

$$\int_{(S)} \chi j_\phi dS = \frac{c}{4\pi} \oint_{(L)} (\xi B_n + \chi B_\tau) dl, \quad (1.1.21)$$

где  $\xi$  — сопряженная с  $\chi$  функция.

В области  $S$  функция  $\xi$  удовлетворяет уравнению Лапласа:  $\Delta(r^{-1}\chi) = 0$ . Ток плазмы может быть представлен в виде набора из  $N$ -токовых колец (нитей). Каждое токовое кольцо характеризуется двумя координатами и значением тока,  $(r_i, z_i, I_i)$ , где  $i = 1, \dots, N$ . Задача формулируется следующим образом: подобрать координаты и амплитуды токовых колец так, чтобы отклонения между экспериментальными и расчетными данными были минимальны.

Рассмотрим две сопряженные функции  $\chi(r, z)$  и  $\xi(r, z)$ . Первая является решением уравнения Г–Ш:

$$\frac{d^2\chi}{dr^2} - \frac{1}{r} \frac{d\chi}{dr} + \frac{d^2\chi}{dz^2} = 0, \quad (1.1.22)$$

а вторая – решением уравнения Лапласа:

$$\frac{d^2\xi}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{d\xi}{dr} + \frac{d^2\xi}{dz^2} = 0. \quad (1.1.23)$$

Выбираем функции  $\chi$  в виде однородных полиномов:

$$\chi_m(r, z) = \sum_{k=0}^{(m/2)-1} (-4)^{-k} \frac{(m-1)!/2}{k!(k+1)!(m-2k-2)!} r^{2k+2} z^{m-k-2}. \quad (1.1.24)$$

В этом случае можно показать, что сопряженные функции  $\xi$  равны

$$\xi_m(r, z) = \sum_{k=0}^{(m/2)-1} (-4)^{-k} \frac{(m-1)!}{k!k!(m-2k-1)!} r^{2k+1} z^{m-2k-1}. \quad (1.1.25)$$

Определим систему моментов плотности тороидального тока плазмы  $Y_m$ , связанную с парой функций  $\chi$  и  $\xi$  следующим соотношением:

$$Y_m = \oint_{(S)} j_\varphi \chi_m dS = \frac{c}{4\pi} \oint_{(L)} (B_\tau \chi_m + B_n \xi_m) dL, \quad (1.1.26)$$

где  $S$  – площадь, ограниченная измерительным контуром  $L$ ;  $B_\tau$  и  $B_n$  – тангенциальная и нормальная компоненты индукции магнитного поля к данному контуру.

Для системы токовых колец распределение плотности тока  $j_\varphi(r, z)$  может быть представлено в виде:

$$j_\varphi(r, z) = \sum_{k=1}^N I_k \delta(r - r_k, z - z_k). \quad (1.1.27)$$

Следовательно, уравнение для  $Y_m$  принимает вид:

$$\sum_{k=1}^N I_k \chi_m(r_k, z_k) = Y_m, \quad (1.1.28)$$

где моменты плотности тока  $Y_m$  вычислены через контурные интегралы.

При восстановлении крайней магнитной поверхности ток плазмы моделируется некоторым количеством тонких токовых колец.

Задача определения полоидального магнитного поля  $\vec{B}_p$  или магнитного потока  $\psi$  плазмы в некоторой точке наблюдения  $(r_v, z_v)$ , в силу аддитивности искомых величин, сводится к задаче отыскания магнитного поля или потока, обусловленного током  $I_c$ , текущим по бесконечно тонкому кольцу, проходящему через точку  $(r_c, z_c)$ , с последующим суммированием найденных значений по всем токовым кольцам.

Для вычисления потоковой функции используется функция Грина  $G(r_c, z_c, r_v, z_v)$ :

$$G(r_c, z_c, r_v, z_v) = \frac{8\pi}{c} \sqrt{\frac{r_c r_v}{k^2}} \left[ \left(1 - \frac{k^2}{2}\right) K(k^2) - E(k^2) \right]. \quad (1.1.29)$$

Значение потоковой функции определяется следующей формулой:

$$\psi(r_v, z_v) = G(r_c, z_c, r_v, z_v) \cdot I_c = I_c \frac{8\pi}{c} \sqrt{\frac{r_c r_v}{k^2}} \left[ \left(1 - \frac{k^2}{2}\right) K(k^2) - E(k^2) \right], \quad (1.1.30)$$

где

$$k^2 = \frac{4r_c r_v}{(r_v + r_c)^2 + (z_v - z_c)^2}, \quad (1.1.31)$$

$K(k^2)$  и  $E(k^2)$  – полные эллиптические интегралы первого и второго рода, соответственно.

Поле от кольца с единичным током можно определить по следующим формулам [13]:

$$B_r = 2 \frac{I}{c} \frac{z_v - z_c}{r_v \sqrt{(r_v - r_c)^2 + (z_v - z_c)^2}} \left[ -K(k^2) + \frac{r_c^2 + r_v^2 + (z_c - z_v)^2}{(r_c - r_v)^2 + (z_c - z_v)^2} E(k^2) \right];$$

$$B_z = 2 \frac{I}{c} \frac{1}{\sqrt{(r_v - r_c)^2 + (z_v - z_c)^2}} \left[ K(k^2) + \frac{r_c^2 - r_v^2 - (z_c - z_v)^2}{(r_c - r_v)^2 + (z_c - z_v)^2} E(k^2) \right]. \quad (1.1.32)$$

Суммируя вклады от всех колец, представляющих как тороидальный ток плазмы, так и систему обмоток, можно вычислить распределения потока и индукции поля, необходимые для управления формой. Данный метод обладает одним существенным недостатком с точки зрения его использования для управления формой в реальном масштабе времени. Этот недостаток заключается в том, что, поскольку для поиска координат и токов в нитях используется оптимизационный алгоритм, нельзя гарантировать сходимость итерационного процесса в ограниченное циклом управления время. Сходимость процесса будет сильно зависеть от начальных приближений. Например, в програм-

многочисленном коде  $rtEFIT$ , для устранения этого недостатка использован метод, описанный в [14]. Количество итераций данного метода ограничено, и если в предыдущем цикле управления искомое значение не достигнуто, то новые параметры будут использованы в качестве начальных приближений в следующем цикле управления. Данный подход, по мнению авторов, обеспечивает сходимость процесса на  $N$ -м цикле управления при возможности отсутствия сходимости на первых циклах.

Все приведенные выше соотношения справедливы и для метода фиксированных нитей. Отличие заключается в том, что в данном случае координаты токовых элементов заданы заранее. Такой подход позволяет в значительной мере снизить вычислительные затраты, поскольку большую часть вычислений будет занимать расчет функций Грина, содержащих эллиптические интегралы, которые в свою очередь нерешаемы в аналитическом виде. Благодаря тому, что координаты токовых нитей в процессе расчета не меняются, при цифровой реализации блока управления формой плазмы вычисление функций Грина может быть выполнено заранее и сохранено в виде табличных значений. Основным недостатком данного метода является отсутствие гибкости по отношению к различным магнитным конфигурациям плазмы. Но одним из возможных решений этой проблемы может быть формирование различных наборов токовых нитей для разных фаз разряда. В этом случае данные конфигурации являются аналогом базы данных распределенных параметров ТОКАМАКа, применяемой в методах первого класса. Следовательно, для функционирования данного метода необходимы предварительные исследования, заключающиеся в подборе конфигураций токовых нитей для ТОКАМАКа КТМ в предполагаемых сценариях разрядов и для каждой из фаз планируемого разряда [15].

Третий класс методов в настоящее время также достаточно распространен ввиду своей простоты. Разложение потоковой функции  $\Psi$  с использованием ряда Тейлора является самым простым методом в данном классе. Метод имеет следующие недостатки: отсутствие возможности локализации  $X$ -точки, низкая точность в случае удаленности измерительного контура (контура, на котором установлены датчики) от границы плазмы. Для случая диверторной конфигурации плазмы подходит метод разложения по тороидальным гармоникам и его модификации такие как, метод мультипольных моментов, метод моментов давления и т. п., поскольку этот метод позволяет локализовать  $X$ -точку. Информация по методу мультипольных моментов достаточно противоречива. С одной стороны, метод потенциально может быть использован

для диверторной конфигурации и свободен от недостатков методов конечных элементов, с другой стороны, некоторые авторы отмечают, что используемый в методе базис в виде функции Лежандра не совсем подходит к вытянутым конфигурациям плазмы. Однако, несмотря на отмеченное выше, метод достаточно широко используется на установках с сильно вытянутым сечением, таких как TCV, C-Mod, а также на стеллараторах, конфигурация которых характеризуется кроме сильной вытянутости сильной треугольностью. Приведем основные соотношения для метода мультипольных моментов.

Метод мультипольных моментов основан на полуаналитическом решении уравнения Грэда–Шафранова с использованием тороидальных координат. Использование тороидальных координат позволяет убрать из уравнений члены, зависящие от тороидального угла и таким образом свести задачу к двумерной. При этом функция полоидального потока, должна удовлетворять условиям уравнения Грэда–Шафранова:  $\Delta^* \Psi = -2\pi\mu_0 R j_\varphi$  внутри плазмы и  $\Delta^* \Psi = 0$  вне плазмы. Связь тороидальных координат с цилиндрическими  $(R, Z, \varphi)$  и декартовыми  $(x, y, z)$  определяется следующими выражениями:

$$\left. \begin{aligned} R &= \frac{R_0 \operatorname{sh} \xi}{\operatorname{ch} \xi - \cos \omega} \\ Z &= \frac{R_0 \sin \omega}{\operatorname{ch} \xi - \cos \omega} \end{aligned} \right\}; \quad (1.1.33)$$

$$\left. \begin{aligned} \varphi &= \varphi; \\ x &= \frac{R_0 \operatorname{sh} \omega}{\operatorname{ch} \omega - \cos \xi} \cos \varphi \\ y &= \frac{R_0 \operatorname{sh} \omega}{\operatorname{ch} \omega - \cos \xi} \sin \varphi \\ z &= \frac{R_0 \sin \omega}{\operatorname{ch} \omega - \cos \xi} \end{aligned} \right\}. \quad (1.1.34)$$

Функции, удовлетворяющие уравнению Грэда–Шафранова, могут быть выражены через функции Лежандра полуцелого аргумента:

$$\Psi_m^{i,c} = \frac{\operatorname{sh} \xi P_{m-1/2}^1(\operatorname{ch} \xi) \cos(m\omega)}{\sqrt{\operatorname{ch} \xi - \cos \omega}}; \quad (1.1.35)$$

$$\Psi_m^{e,c} = \frac{\operatorname{sh} \xi Q_{m-1/2}^1(\operatorname{ch} \xi) \cos(m\omega)}{\sqrt{\operatorname{ch} \xi - \cos \omega}}; \quad (1.1.36)$$

$$\Psi_m^{i,s} = \frac{sh\xi P_{m-1/2}^1(ch\xi) \sin(m\omega)}{\sqrt{ch\xi - \cos \omega}}; \quad (1.1.37)$$

$$\Psi_m^{e,c} = \frac{sh\xi Q_{m-1/2}^1(ch\xi) \sin(m\omega)}{\sqrt{ch\xi - \cos \omega}}. \quad (1.1.38)$$

На основании этого становится возможным разложить функцию потока по тороидальным гармоникам:

$$\Psi(\theta, \omega) = \sum_{m=1}^{\infty} \{ M_m^{i,c} \Psi_m^{i,c} + M_m^{e,c} \Psi_m^{e,c} + M_m^{i,s} \Psi_m^{i,s} + M_m^{e,s} \Psi_m^{e,s} \}. \quad (1.1.39)$$

Коэффициенты разложения  $M_m^{i,c/s}$  называют внутренними и внешними мультипольными моментами соответственно. Значения коэффициентов определяются из диагностических данных [9].

Следует отметить, что все рассмотренные выше методы могут использоваться как для реконструкции формы плазмы, так и для определения положения плазменного шнура. При этом в случае использования методов для определения положения соотношения значительно упрощаются, что делает возможным их использование в управлении плазмой в реальном масштабе времени. Все перечисленные методы не накладывают ограничений на номенклатуру используемых датчиков электромагнитной диагностики, т. е. могут быть использованы как локальные (зонды), так и распределенные датчики (петли).

Из проведенного выше анализа следует, что большинство перечисленных методов в той или иной мере могут быть применены для оперативного либо неоперативного управления профилем плазмы. Наиболее перспективными методами для использования в контурах оперативного управления являются метод токовых нитей и метод мультипольных моментов.

#### 1.1.1.4. Измерение положения внешней границы плазмы и распределения плотности плазмы по радиусу

При проведении научных исследований изменения профиля плотности электронов необходимо иметь высокую точность и динамику измерений. Процесс управления плазмой требует более низкой точности измерений, но высокой скорости обработки и передачи информации в систему управления плазмой в реальном масштабе времени. Необходимость подобных измерений обусловлена тем, что алгоритмы реконструкции формы плазмы относятся к классу некорректных задач, в связи с чем наличие дополнительных диагностических данных, позволит



снизить неустойчивость решения и, таким образом, повысить эффективность функционирования СУП.

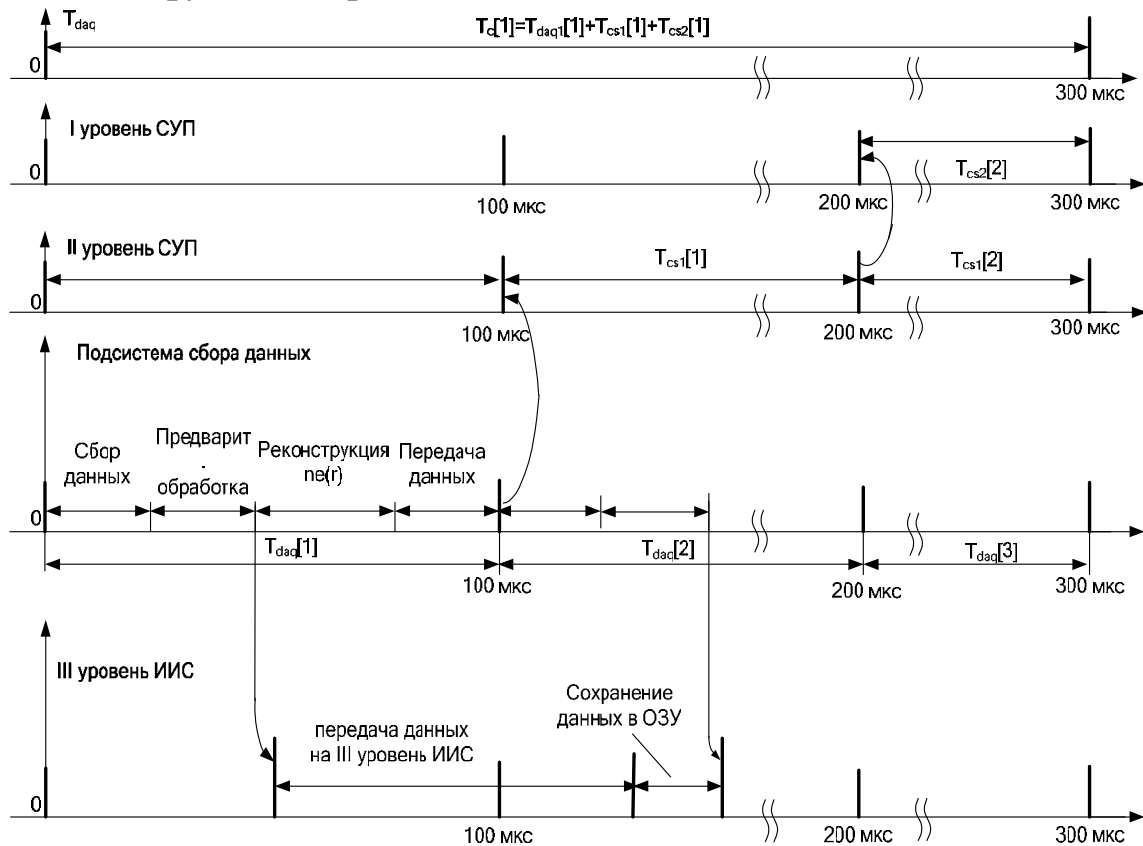


Рис. 1.1.5.1. Временная диаграмма выполнения предварительной обработки

Требования к сбору данных при проведении научных исследований зависят от пространственного и временного разрешения радар-рефлектометра. Система управления плазмой определяет дополнительные требования, а именно: длительность цикла сбора данных с диагностик плазмы –  $T_{daq}$ , которое зависит от длительности цикла управления –  $T_{cs}$  (рис. 1.1.5.1). В соответствии приведенной на рис. 1.1.5.1 диаграммой, длительность цикла  $T_{daq}$  должна быть менее 100 мкс. Требуется оценить время выполнения всех составляющих алгоритма сбора данных  $T_{daq}$ : сбор данных, предварительную обработку, передачу данных в СУП, и, при необходимости, провести минимизацию времени выполнения вышеперечисленных операций.

### Оценка времени выполнения операции сбора данных с диагностик плазмы

Период сбора данных включает время опроса 3-х неперестраиваемых и одного перестраиваемого каналов. Для неперестраиваемых каналов время опроса составит 3 мкс. Время сбора данных для канала с пе-

рестраиваемой частотой будет определяться временем развертки частоты и составит  $\sim 30$  мкс. Таким образом, время оцифровки данных 4-х каналов составляет  $\sim 33\dots 40$  мкс.

Предварительная обработка используется для повышения достоверности измерительной информации.

Для уменьшения времени предварительной обработки можно начать обработку при получении данных с первого неперестраиваемого канала и выполнять параллельные вычисления для всех каналов на аппаратном уровне. Таким образом, время предварительной обработки составит менее 10 мкс.

Разделение информационных потоков требуется для передачи измерительной информации в СУП и на третий уровень информационно-измерительной системы (ИИС). Таким образом, желательно разделить эти два информационных потока сразу после оцифровки. Для разделения информационных потоков предложено следующее решение. Данные с АЦП записываются в разделяемую двухпортовую память. Ячейки памяти одновременно считываются в два порта без дополнительных задержек. Данные из первого порта передаются на третий уровень ИИС. Данные со второго порта используются при реконструкции профиля плотности в реальном масштабе времени.

Время реконструкции профиля плотности зависит от алгоритма и способа его реализации. Высокая точность реконструкции не обязательна для СУП, но при этом требуется высокая скорость обработки. Для оценки скорости вычислений в случае использования каналов с неперестраиваемыми генераторами разработан следующий простой алгоритм.

В первой части алгоритма вычисление интегрального уравнения –

$$\varphi(\omega) = 2 \frac{\omega}{c} \int_{x_0}^{x_c} N(w, x) dx + \varphi_0(w) \quad (1.1.40)$$

– выполняется путем замены интегрирования суммированием и выполнением подстановок  $dx = x_j - x_{j-1}$ ,  $N_i = (N_{i,j} + N_{i,j-1})/2$ ,  $\varphi_0(w) = 0$ . Следовательно,

$$\varphi_i = \sum_{j=1}^{j=i} A_{i,j} (x_j - x_{j-1}), \quad (1.1.41)$$

где  $A_{i,j} = \frac{(N_{i,j} + N_{i,j-1})w_i}{c}$ ;  $\varphi$  – сдвиг фазы;  $N$  – рефракционный индекс;

$x$  – положение отражающего слоя.

Вычисление уравнения (1.1.41) дает значения позиций отражающих слоев  $\{x_i\}$ ,  $i = 1, 2 \dots 10$ . Во второй части алгоритма эти точки используются при аппроксимации профиля плотности электронов по методу наименьших квадратов.

Для оценки времени выполнения алгоритма была использована программируемая логическая интегральная схема (ПЛИС) Altera FLEX10K. Время обработки составило меньше 40 мкс. Это подтверждает то, что представленное техническое решение обеспечивает приемлемое время обработки.

Задача обработки усложняется, когда в составе одного радар-рефлектометра совместно используются перестраиваемые и неперестраиваемые генераторы частоты. При этом фактически приходится выполнять два алгоритма обработки, в каждом из которых определяются свои участки профиля плотности электронов. Результаты разработки алгоритма реконструкции профиля плотности для канала с перестраиваемым СВЧ-генератором показали, что, несмотря на рост времени выполнения обработки данных, алгоритм реконструкции профиля плазмы может быть выполнен за время, не превышающее 100 мкс.

Передача данных в СУП должна выполняться в каждом цикле управления за время, не превышающее 10 мкс. При этом профиль плотности достаточно описать десятью коэффициентами по 4 Байт каждый. В соответствии с техническими решениями по созданию первой очереди системы управления ТОКАМАКа КТМ, модули подсистемы сбора данных будут входить в состав VME-крейта 2-го уровня системы управления плазмы. В этом случае передача данных будет выполняться по VME-шине и требуемая скорость передачи будет достигнута.

Подробное описание диагностической подсистемы для проведения указанных измерений приведено в соответствующем разделе технического проекта ИИС.

#### 1.1.1.5. Измерение интенсивности мягкого рентгеновского излучения и температуры электронов

Измерения интенсивности мягкого рентгеновского излучения позволяет определить один из важных параметров плазмы — температуру электронов. Возникновение мягкого рентгеновского излучения в плазме связано с присутствием в ней примесей, за счет торможения на них электронной компоненты плазмы. Измерения температуры электро-

нов позволяет косвенно оценить внутреннюю структуру плазменного шнура. Поскольку источником излучения являются носители тока, данная информация в совокупности с другими диагностическими данными может быть использована в контуре управления плазмой. Кроме отмеченного, температура электронов напрямую связана с проводимостью плазменного шнура следующим соотношением:  $\sigma \sim T_e^{3/2}$ .

Связь между интенсивностью рентгеновского излучения и температурой электронов описывается уравнением (1.1.42):

$$F(T_e) = \frac{J_1}{J_2}, \quad (1.1.42)$$

где  $J_1, J_2$  – интенсивности мягкого рентгеновского излучения, измеренные детекторами с использованием поглощающих фильтров разной толщины.

Более подробное описание методики измерения интенсивности можно найти в разделе ИИС ТОКАМАКа КТМ.

Использование информации о температуре электронов целесообразно при неоперативном управлении (для коррекции сценария разряда в послепусковом режиме).

### **1.1.2. Контур управления положением плазмы**

Алгоритмы управления положением плазменного шнура обычно рассматриваются совместно с алгоритмами управления формой. Это обусловлено тем, что положение плазменного шнура, а точнее положение центроида тока плазмы, по сути, не имеет смысловой нагрузки без знания формы шнура. Когда идет речь об управлении положением плазменного шнура, то цель такого управления – снизить динамику неустойчивости положения плазмы в вертикальном направлении для того, чтобы управлять формой в приемлемых временных рамках. Иными словами, главная цель управления положением плазменного тора является предотвращение касания плазмой стенок вакуумной камеры, что достижимо только при управлении положением и формой плазмы одновременно. Положение тора плазмы, задаваемое в виде зазоров между плазмой и стенкой, определяется формой плазменного тора, а точнее его вытянутостью и треугольностью. Не тривиальной, в этом случае, является задача управления вертикальным положением, поскольку данный параметр для плазменного тора с сильной вытянутостью обладает значительной неустойчивостью.

### 1.1.2.1. Структурная схема контура

Динамика вертикальных перемещений плазмы КТМ в базовом режиме ( $k_x = 1,9$ ) описывается следующими уравнениями [41]:

$$\begin{aligned} \dot{Z}(t) &= \gamma Z(t) + b[I(t) + W(t)]; \\ LI(t) &= U(t) - RI(t), \end{aligned} \quad (1.1.2.1)$$

где  $Z(t)$  – смещение плазмы по вертикали;  $I(t)$  – ток обмотки управления;  $W(t)$  – аддитивное возмущение, выраженное в единицах тока обмотки управления;  $b$  – динамическая эффективность обмотки управления;  $\gamma$  – инкремент неустойчивости вертикальных перемещений плазменного шнура;  $L$ ,  $R$  – индуктивность и активное сопротивление обмоток управления;  $U(t)$  – напряжение на обмотке управления.

Инкремент неустойчивости плазмы [41], с учетом компенсации вертикальной неустойчивости витками пассивной стабилизации, составляет  $\gamma = 300 \text{ с}^{-1}$ .

Методы вычисления положения плазменного шнура  $Z(t)$  на основе данных электромагнитной диагностики приведены в разделе 1.1.1.

Структурная схема контура управления положением плазменного тора представлена на рис. 1.1.2.1 и включает: регулятор ( $R$ ) и устройство управления ключами инвертора (УУ). Для определения закона регулирования и параметров настройки регулятора используется математическая модель объекта управления, представленная уравнениями (1.1.2.2)–(1.1.2.4).

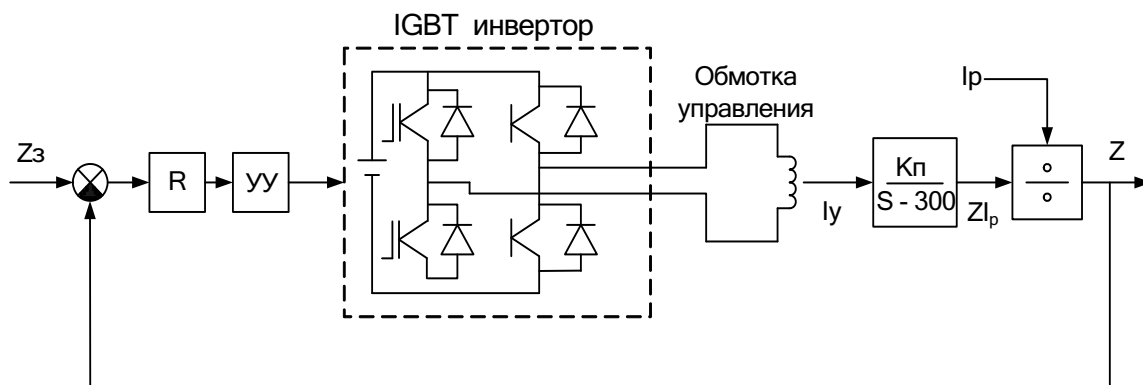


Рис. 1.1.2.1. Структура контура управления положением

Согласно уравнениям (1.1.2.1) и с учетом дискретного преобразования, передаточная функция плазмы будет выглядеть следующим образом:

$$W(z) = \frac{z}{z - A_2}. \quad (1.1.2.2)$$

Для электромагнитных обмоток управления положением плазмы НФС:

$$W(Z) = \frac{K_4}{z - A_1}. \quad (1.1.2.3)$$

Для оценки адекватности данной модели приведем передаточную функцию для наиболее близкого к КТМ по основным параметрам ТО-КАМАКа-ТСV, которая выглядит следующим образом [7]:

$$W(s) = \frac{ZI_p}{U_y} = \frac{1,31 \cdot 10^{-5} s^2 + 1,37 \cdot 10^{-1} s + 112,2}{-2,43 \cdot 10^{-11} s^4 - 6,23 \cdot 10^{-8} s^3 - 2,85 \cdot 10^{-5} s^2 + 4,42 \cdot 10^{-3} s^2 + 1}. \quad (1.1.3.4)$$

Следует отметить, что передаточная функция, полученная на ТО-КАМАКе-ТСV по результатам идентификации на основе активного эксперимента, уже включает в себя математическую модель обмоток управления. Следует отметить, что передаточная функция для КТМ имеет меньший порядок, но основным моментом, подтверждающим адекватность выбранного описания, является наличие в обеих передаточных функциях положительных корней, что свидетельствует о наличии неустойчивости. Уточнение передаточной функции КТМ в контуре управления положением плазмы может быть осуществлено на начальных этапах функционирования установки по результатам проведенных экспериментов.

### 1.1.2.2. Закон управления положением плазмы

В большинстве работ, посвященных задаче стабилизации положения плазмы по вертикали, предлагается в качестве регулятора использовать регулятор ПИД типа. Учитывая тот факт, что интегрирующая составляющая алгоритма ПИД регулятора предназначена в классических САУ для автоматического сведения величины отклонения от заданного значения в нуль, что не требуется при стабилизации вертикального положения ввиду потенциальной неустойчивости объекта управления, в качестве алгоритма стабилизации выбираем закон регулирования ПД типа. Передаточная функция для ПД регулятора после  $z$ -преобразования выглядит следующим образом:

$$W(z) = K_1 + K_2 \frac{z-1}{Tz}, \quad (1.1.2.4)$$

где  $K_1$  и  $K_2$  – коэффициенты пропорциональной и дифференцирующей частей;  $T$  – период квантования.

Структурная схема контура управления по положению с учетом отмеченного приведена на рис. 1.1.2.2.

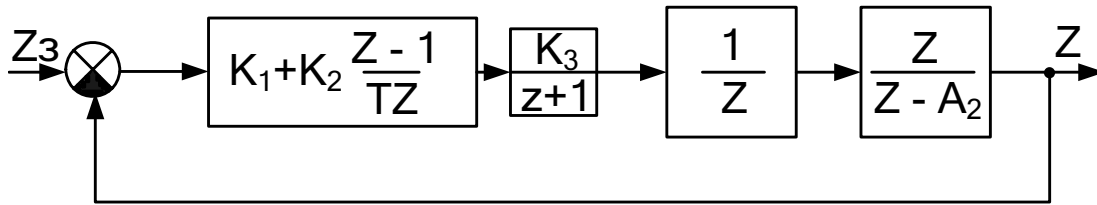


Рис. 1.1.2.2. Структурная схема САУ положением плазмы по вертикали:  
 $Z_3$  – уставка по положению плазмы по вертикали;  
 $K_3$  – коэффициент передачи управляемого преобразователя

Наряду с отмеченным, в случае использования алгоритма управления формой ММО (см. п. 1.1.1.1), в законе регулирования положением может отсутствовать пропорциональная составляющая. Управление положением в данном случае будет заключаться в снижении динамики системы для адекватной работы менее динамичного контура, а именно: контура управления формой.

Определим значения коэффициентов  $K_2$  ( $K_1$  – заданное) и  $K_1$  ( $K_2$  – заданное), при которых данная система управления будет устойчива. Для нахождения коэффициентов воспользуемся критерием Джюри для импульсных систем.

Характеристическое уравнение для замкнутой системы будет иметь следующий вид (при  $K_1 = 1000$ ):

$$Q(z) = 1 \cdot 10^{-4} z^2 - 2,99 \cdot 10^{-2} z^3 - 3 \cdot 10^{-2} z^2 + (2000 \cdot K_2 + 200) z - 2000 \cdot K_2 = 0.$$

Вычислим коэффициенты и составим таблицу Джюри (табл. 1.1.2.1).

Таблица 1.1.2.1

Таблица Джюри при  $K_1 = 1000$

$z^0$	$z^1$	$z^2$	$z^3$	$z^4$
-2000	$2000 \cdot K_2 + 200$	$-3 \cdot 10^{-2}$	$-2,99 \cdot 10^{-2}$	$1 \cdot 10^{-4}$
$1 \cdot 10^{-4}$	$-2,99 \cdot 10^{-2}$	$-3 \cdot 10^{-2}$	$2000 \cdot K_2 + 200$	-2000
$4 \cdot 10^6 \cdot K_2^2 -$ $-6,97 \cdot 10^{-19}$	$-4 \cdot 10^6 \cdot K_2^2 - 4 \cdot 10^6 \cdot K_2 -$ $-1,19 \cdot 10^{-3}$	$1,002 \cdot K_2 +$ $+4,18 \cdot 10^{-13}$	$-3 \cdot 10^{-3} \cdot K_2 -$ $-1,67 \cdot 10^{-7}$	
$-3 \cdot 10^{-3} \cdot K_2 -$ $-1,67 \cdot 10^{-7}$	$1,002 \cdot K_2 +$ $+4,18 \cdot 10^{-13}$	$-4 \cdot 10^6 \cdot K_2^2 - 4 \cdot 10^6 \cdot K_2 -$ $-1,19 \cdot 10^{-3}$	$4 \cdot 10^6 \cdot K_2^2 -$ $-6,97 \cdot 10^{-19}$	
$-2,79 \cdot 10^{-14} +$ $+1,002 \cdot 10^{-9} \cdot K_2 -$ $-9 \cdot 10^{-6} \cdot K_2^2 +$ $+16 \cdot 10^{11} \cdot K_2^4$	$6 \cdot 10^{-20} + 1,67 \cdot 10^{-7} \cdot K_2 -$ $47,6 \cdot K_2^2 - 16 \cdot 10^{11} \cdot K_2^3 -$ $-16 \cdot 10^{11} \cdot K_2^4$	$-1,99 \cdot 10^{-12} -$ $-0,677 \cdot K_2 +$ $+11999,33 \cdot K_2^2 +$ $+4,02 \cdot 10^6 \cdot K_2^3$		

Исходя из критериев устойчивости плазмы:

$$\left. \begin{aligned} Q(1) &> 0 \\ (-1)^n \cdot Q(-1) &> 0 \\ |a_0| &< a_n, \\ |b_0| &> |b_n - 1|, \\ |c_0| &> |c_n - 2| \end{aligned} \right\},$$

система уравнений устойчива если значение коэффициента  $K_2$  находится в области  $0 < K_2 < 4,175 \cdot 10^{-13}$ .

### 1.1.3. Контур управления током плазмы

Основным интегральным параметром, характеризующим состояние плазмы, является тороидальный ток. От данного параметра в той или иной мере зависят фактически все параметры плазмы.

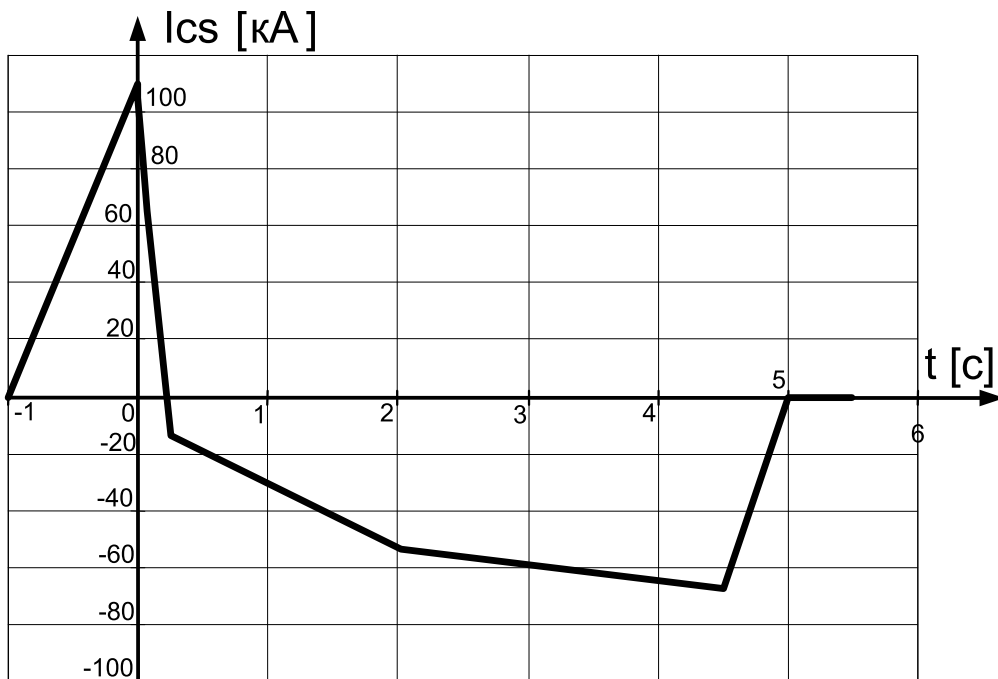


Рис. 1.1.3.1. График изменения тока в индукторе  $I_{cs}(t)$  во времени

Таким образом, качественное управление током плазмы предопределяет качество функционирования СУП в целом. Задачу управления током плазмы можно условно разделить на три основных этапа: инициация разряда и рост тока плазмы, поддержание тока на заданном уровне (плато тока), гашение разряда (вывод тока плазмы). Плазменный разряд инициируется и затем поддерживается в течение разряда пу-



тём управляемого изменения тока  $I_{cs}$  в обмотке омического нагрева CS или индукторе. Вид зависимости  $I_{cs}(t)$ , предварительно рассчитываемой и задаваемой в СУП перед очередным разрядом, показан на рис. 1.1.3.1.

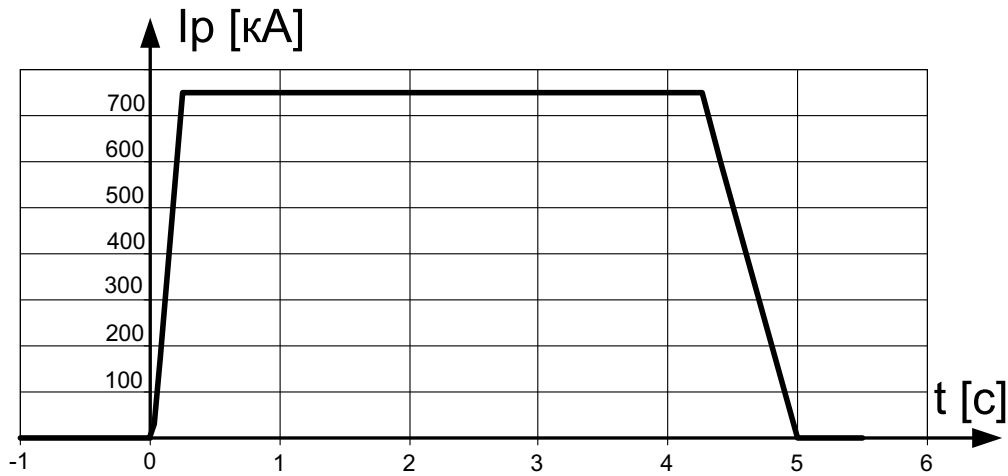


Рис. 1.1.3.2. График изменения тока плазмы  $I_p(t)$  во времени

Отработка этой зависимости в СУП приводит к пробую рабочего газа в центре камеры КТМ, росту тока плазмы до заданного значения  $I_p = 0,75$  МА и его поддержанию в течение 5 с на постоянном уровне. Важно отметить, что отработка зависимости  $I_{cs}(t)$  в режиме логико-программного управления в данном случае неприемлема, поскольку параметры индуктивности  $L_i$  и проводимости  $\sigma_p$  плазмы, определяющие эффективность процесса трансформации энергии индуктора в плазму, постоянно изменяются в течение разряда. Поэтому СУП должна постоянно вести контроль величины  $I_p$  и корректировать зависимость  $I_{cs}(t)$ , чтобы поддерживать ток плазмы на заданном уровне.

### 1.1.3.1. Структурно-функциональная схема контура управления током плазмы

В соответствие с задачей, выполняемой контуром управления током плазмы, необходимо разработать структурную схему подсистемы, которая обеспечивала бы управление током плазмы согласно заданной программе эксперимента. Предлагаемая схема представлена на рис. 1.1.3.3. Подсистема состоит из контроллера, который работает в 2 режимах: режим изменения тока плазмы  $I_{p\text{ зад}}(t)$  и режим изменения тока в индукторе  $I_{cs\text{ зад}}(t)$ .

В качестве первичных преобразователей величины тока плазмы используются три пояса Роговского.

Необходимо провести синтез закона управления током плазмы.

Структурная схема контура управления (рис. 1.1.3.3) представляет систему с жесткой обратной связью по току плазмы, если установка работает по сценарию изменения тока плазмы. Текущее значение тока плазмы измеряется и нормализуется в измерительном канале (ИК).

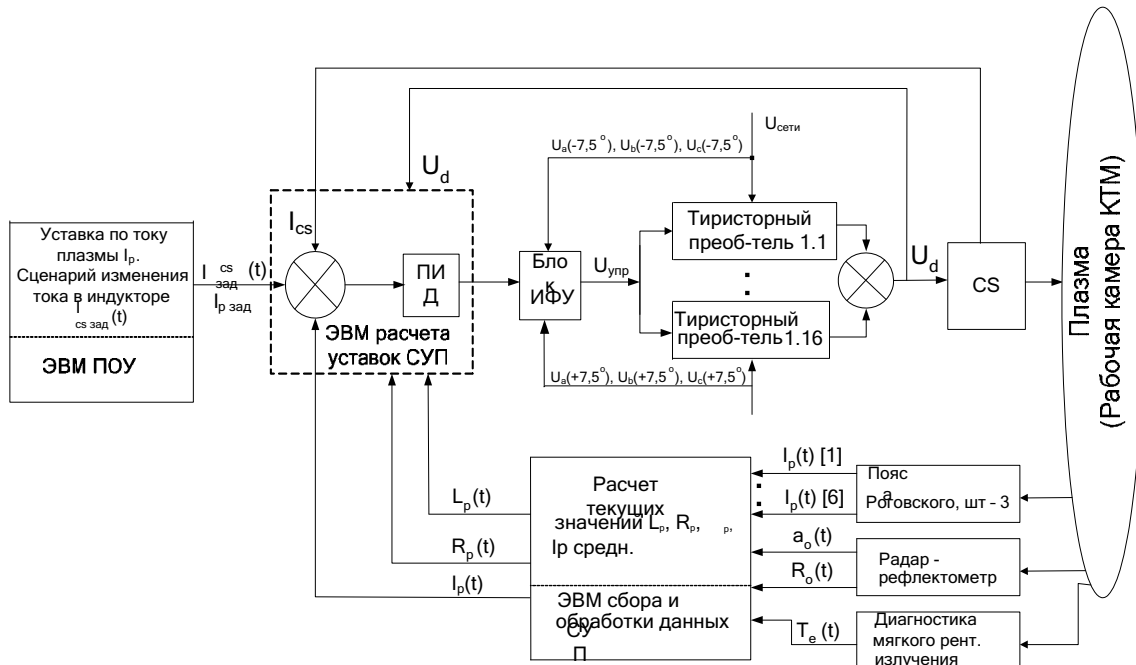


Рис. 1.1.3.3. Структурная схема контура управления током плазмы в КТМ

Усредненное значение тока плазмы подается на элемент сравнения (ЭС), где сравнивается с сигналом, формируемым задатчиком сценария тока. Полученный сигнал рассогласования поступает на пропорционально-интегрально-дифференцирующий регулятор (ПИД), реализуемый в ЭВМ расчета уставок для источника питания (ИП). Затем сигнал в виде значения угла открытия тиристорov подается в блок фазо-импульсного управления преобразователями (блок ФИУ). Далее с блока ФИУ сигнал подается в систему управления тиристорными преобразователями, включенными по параллельно-последовательной схеме. На выходе схемы формируется напряжение  $U_d$ , определяющее величину тока в обмотке ОН. Далее энергия обмотки ОН передается плазме.

Если работа установки производится по второму алгоритму, то в ЭВМ расчета уставок для ИП загружается программа, соответствующая  $I_{cs}(t)$  сценарию изменения тока в обмотке ОН. В этом случае на ЭС происходит сравнение  $I_{он.уст}$  и текущего значения тока в индукторе, и на ПИД регулятор поступает сигнал рассогласования этих двух величин, т. е. ПИД регулятор работает в контуре стабилизации тока  $I_{cs}$ . Параметры настройки регулятора и передаточная функция разомкнутой системы в

этом случае должны быть другие. При этом величина тока плазмы измеряется только для контроля и не используется в контуре управления.

Для оценки устойчивости системы в замкнутом состоянии и ее показателей качества необходимо определить передаточные функции отдельных звеньев САУ.

Передаточную характеристику источника питания, работающего по 24-пульсной схеме можно представить в виде:

$$W_{ТП}(p) = \frac{K_{ТП}}{T_{ТП} \cdot p + 1} \cdot e^{-p \cdot \tau_{ТП}},$$

где  $K_{ТП} = U_d / \alpha$ .

Постоянная времени  $T_{ТП}$  определяется как  $T_{ТП} = T_{0,95} / 3$ , где  $T_{0,95}$  — время необходимое для достижения выходным напряжением источника питания  $U_d = 95\%$  уровня относительно установившегося значения. Время  $T_{0,95}$  для ИП с 24-пульсной схемой будет составлять около 120 электрических градусов и равно в секундах:

$$T_{ТП} = 120 / (3 \cdot 2 \cdot \pi \cdot f) = 120 / (6 \cdot 50 \cdot 180) = 0,0022 \text{ с.}$$

Транспортное запаздывание  $\tau_{ТП}$  можно определить как максимально возможную задержку между моментом выдачи регулятором управляющего воздействия и началом ее отработки в преобразователе, которое наступает в ближайшей точке естественной коммутации. Для ИП, работающего по 24-х пульсной схеме, такая задержка будет составлять максимально 15 электрических градусов, что во временной области будет равно:  $\tau_{ТП} = 1 \cdot 15 / (2 \cdot \pi \cdot f) = 0,0008 \text{ с.}$

Для определения передаточной характеристики по току системы «Обмотка ОН–плазма», рассмотрим рис. 1.1.3.4.

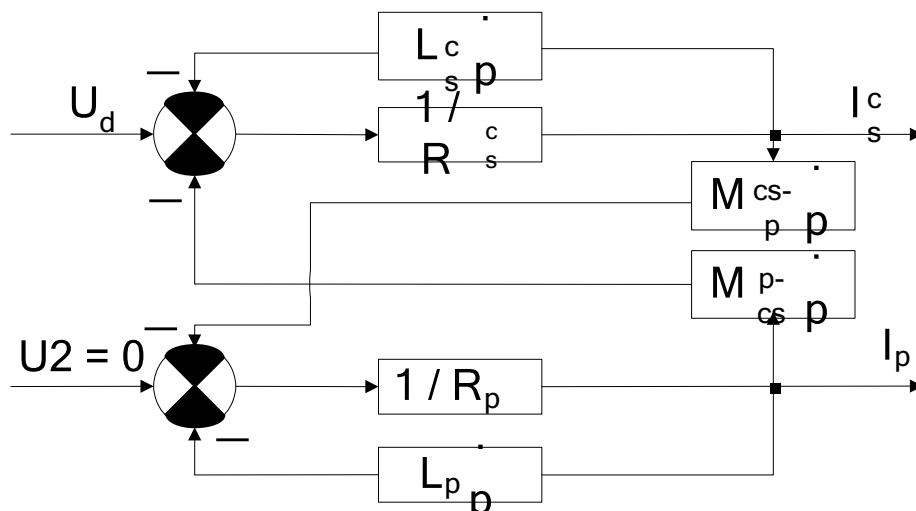


Рис. 1.1.3.4. Структурная схема системы «Обмотка ОН–плазма»

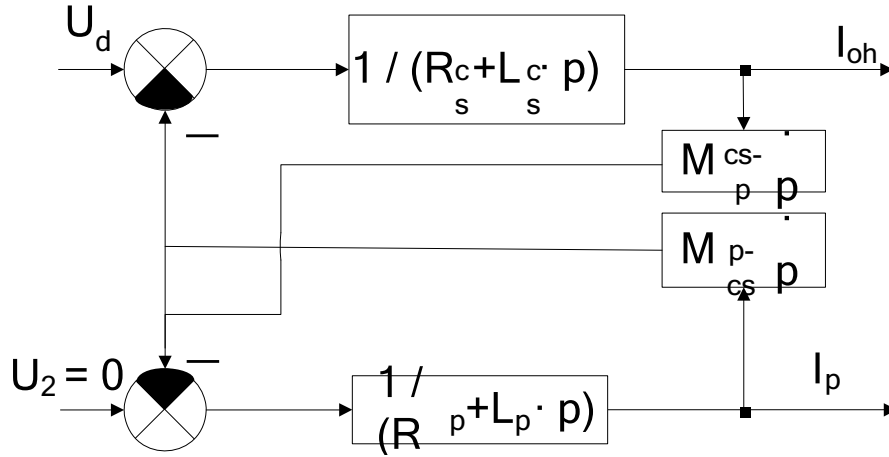


Рис. 1.1.3.5. Преобразованная структурная схема системы «обмотка ОН–плазма»:  $U_d$  – напряжение на обмотке ОН;  $R_{cs}$  – сопротивление обмотки омического нагрева;  $I_{cs}$  – ток в обмотке ОН;  $R_p$  – сопротивление плазмы;  $I_p$  – ток плазмы;  $L_{cs} \cdot p$  и  $L_p \cdot p$  – ЭДС самоиндукций;  $M_{cs} \cdot p$  и  $M_p \cdot p$  – ЭДС взаимоиנדукций

После преобразований получаем схему, представленную на рис. 1.1.3.5. Передаточная функция плазмы равна отношению операторного изображения по Лапласу выходной координаты системы (ток плазмы) к операторному изображению по Лапласу входной координаты системы (напряжение на обмотке ОН):

$$I_{cs}(p) = U_d(p) / (R_{cs} + L_{cs} \cdot p) - I_p \cdot M_{p-cs} \cdot p / (R_{cs} + L_{cs} \cdot p). \quad (1.1.3.1)$$

$$I_p(p) = -I_{cs} \cdot M_{cs-p} \cdot p / (R_p + L_p \cdot p). \quad (1.1.3.2)$$

$$I_p(p) \cdot (R_p + L_p \cdot p) / M_{p-cs} \cdot p = U_{cs}(p) / (R_{cs} + L_{cs} \cdot p) - I_{cs}(p) \cdot M_{p-cs} \cdot p / (R_{cs} + L_{cs} \cdot p);$$

$$I_p(p) \cdot [(R_p + L_p \cdot p) / M_{p-cs} \cdot p - M_{p-cs} \cdot p / (R_{cs} + L_{cs} \cdot p)] = U_d(p) / (R_{cs} + L_{cs} \cdot p);$$

$$W_{cs-p}(p) = I_p(p) / U_d(p);$$

$$W_{cs-p}(p) = M_{cs-p} \cdot p / [(R_{cs} + L_{cs} \cdot p)(R_p + L_p \cdot p) - M_{p-cs} \cdot M_{cs-p} p^2].$$

Обозначим  $L_{cs}/R_{cs} = T_1$ ,  $L_p/R_p = T_2$ , тогда

$$W_{cs-p}(p) = M_{cs-p} \cdot p / [(1 + T_1 p)(1 + T_2 p) - M_{p-cs} \cdot M_{cs-p} p^2].$$

Влияние плазмы на электромагнитную обмотку будет меньше, чем влияние обмотки на плазму, поэтому членом  $M_{p-cs} \cdot M_{cs-p} p^2$  можно пренебречь:

$$W_{cs-p}(p) = M_{cs-p} \cdot p / [R_{cs} \cdot R_p (1 + T_1 p)(1 + T_2 p)].$$

Обозначим  $M_{cs-p} \cdot p / R_{cs} \cdot R_p = K_1$ , тогда

$$W_{cs-p}(p) = K_1 \cdot p / [(1 + T_1 p)(1 + T_2 p)].$$

Определим передаточную функцию обмотки омического нагрева.

$$W_{cs}(p) = 1 / (R_{cs} + L_{cs} \cdot p),$$

обозначим  $1 / R_{cs} = K_{cs}$ , тогда

$$W_{cs}(p) = K_{cs} / (1 + T_1 \cdot p).$$

Передаточная характеристика канала измерения будет иметь следующий вид  $W_k(p) = K_u / (1 + T_3 \cdot p)$ .

Вследствие того, что значения индуктивности и проводимости плазмы постоянно изменяются в схеме во времени, кроме поясов Роговского, будут использоваться еще два измерительных канала, в которых рассчитываются текущие значения следующих величин:  $a_o$  – малый радиус плазменного шнура;  $R$  – большой радиус плазменного шнура;  $T_e$  – температура электронов. На основе значений этих величин в ЭВМ сбора и обработки данных СУП происходит вычисление текущих значений индуктивности и сопротивления плазмы.

Индуктивность плазмы, рассматриваемая в приближении кольцевого витка с круговым поперечным сечением как функция большого радиуса  $R$  шнура и тока плазмы  $I_p$ , имеет вид

$$L_p[R(t), I_p(t)] = \mu_0 \cdot R \cdot (\ln[8R / \alpha_0(I_p)] - 2 + l_i / 2 + \beta_0). \quad (1.1.3.3)$$

Здесь  $l_i$  – внутренняя индуктивность распределенного тока, отнесенная к единице длины шнура (приближенно можно принять  $l_i = 0,61$ );  $\beta_0$  – отношение среднего газокINETического давления к магнитному давлению полоидального поля (при расчетах можно принять равной нулю). Сопротивление  $R_p$  плазмы задается функцией времени и связано с проводимостью  $\sigma(t)$  таким образом:

$$R_p(t) = 2R / [\sigma(t) \cdot (a_o(I_p))^2], \quad (1.1.3.4)$$

$$\sigma(t) = 1,31 \cdot 10^3 \cdot T_e(t). \quad (1.1.3.5)$$

Для этого рассчитаем индуктивность и сопротивление плазмы согласно выражениям (4) и (5).

$$L_p = 12,566 \cdot 10^{-7} \cdot 0,86 \cdot (\ln[8 \cdot 0,86 / 0,36] - 2 + 0,305) = 1,356 \cdot 10^{-6} \text{ Гн};$$

$$R_p(t) = 2 \cdot 0,86 / [1,31 \cdot 10^3 \cdot 5000^{1,5} \cdot 0,36^2] = 2,8 \cdot 10^{-7} \text{ Ом}.$$

При этих значениях индуктивности и сопротивления плазмы  $T_2 = 4,84$  с, а  $T_1 = 6,47$  с.

Расчеты показывают, что постоянными времени тиристорного преобразователя и канала измерения можно пренебречь, так как они более чем на порядок меньше  $T_1$  и  $T_2$ . Далее представим объект управления как совокупность тиристорного преобразователя, обмотки омического нагрева, плазмы и канала измерения для контура управления плазмой. Тогда передаточная функция объекта в аналоговом виде равна произведению передаточных функций этих звеньев:

$$W_o = K_1 \cdot K_u \cdot K_{mn} \cdot p / [(1 + T_1 \cdot p)(1 + T_2 \cdot p)],$$

обозначим  $K_1 \cdot K_u \cdot K_{mn} = K_o$ , тогда

$$W_o = K_o \cdot p / [(1 + T_1 \cdot p)(1 + T_2 \cdot p)].$$

В случае управления током в индукторе объект можно представить совокупностью тиристорного выпрямителя, обмотки омического нагрева и канала измерения. Тогда передаточная функция объекта будет выглядеть следующим образом:

$$W_{o1}(p) = K_{o1} / (1 + T_1 \cdot p), \text{ где } K_{o1} = K_{cs} \cdot K_u \cdot K_{mn}.$$

Далее проведем расчет цифрового регулятора для контура управления током методом динамической компенсации.

### 1.1.3.2. Синтез цифрового регулятора

Выполним  $Z$ -преобразование передаточной функции  $W_o$ :

$$\begin{aligned} W_o(z) &= Z\{W_o(p) \cdot W_s(p)\} = \\ &= Z\{K_{op} / [(1 + T_1 \cdot p) \cdot (1 + T_2 \cdot p)] \cdot (1 - \text{EXP}(-T_u/p))\} = \\ &= [K_o(z-1)/z] \cdot Z\{p / [(1 + T_1 p) \cdot (1 + T_2 \cdot p) \cdot p]\} = \\ &= [K_o \cdot (z-1)/z] \cdot 1/T_1 \cdot (z/(z - \text{EXP}[-T_u/T_2])) = \\ &= K_o \cdot (z-1) / (T_1 \cdot (z - \text{EXP}[-T_u/T_2])). \end{aligned}$$

Представим желаемую передаточную функцию всей системы как  $W_c = 1/(T_{жс} \cdot p + 1)$ , где  $T_{жс}$  – желаемая постоянная времени всей системы. Переведем  $W_c$  из аналоговой в дискретную форму, используя дискретный аналог преобразования Лапласа –  $Z$ -преобразования, в которых используется комплексная переменная  $Z = \text{EXP}[p \cdot T_u]$ :

$$\begin{aligned} W_c(z) &= Z\{W_c(p) \cdot W_s(p)\} = [(z-1)/z] \cdot Z\{1/(p \cdot (T_{жс} \cdot p + 1))\} = \\ &= [(z-1)/z] \cdot z \cdot (1 - \text{EXP}[-T_u/T_{жс}]) / (z-1) \cdot (z - \text{EXP}[-T_u/T_{жс}]) = \\ &= (1 - \text{EXP}[-T_u/T_{жс}]) / (z - \text{EXP}[-T_u/T_{жс}]). \end{aligned}$$

Согласно методу динамической компенсации рассчитаем передаточную функцию регулятора:

$$W_r(z) = W_c / [W_o \cdot (1 - W_c)];$$

$$W_r(z) = T_1 \cdot (1 - \text{EXP}[-T_u/T_{\text{жс}}]) \cdot (z - \text{EXP}[-T_u/T_2]) / (K_o \cdot (z-1)^2).$$

Раскроем скобки и умножим числитель и знаменатель на  $z^{-2}$ :

$$W_r(z) = y(z)/x(z) = T_1 \cdot [z^{-1} \cdot (1 - \text{EXP}[-T_u/T_{\text{жс}}]) + z^{-2} \cdot (\text{EXP}[-T_u/T_{\text{жс}} - T_u/T_2] - \text{EXP}[-T_u/T_2])] / [K_o \cdot (1 - 2 \cdot z^{-1} + z^{-2})].$$

Получим рекуррентное соотношение для регулятора, исходя из условия, что  $W_r(z) = y(z)/x(z)$  и

$$\begin{aligned} y(z) \cdot z^0 &= y_i - \text{текущее значение;} \\ y(z) \cdot z^{-1} &= y_{i-1} - \text{предыдущее значение;} \\ x(z) \cdot z^0 &= x_i - \text{текущее значение;} \\ x(z) \cdot z^{-1} &= x_{i-1} - \text{предыдущее значение.} \end{aligned}$$

Тогда получаем

$$y_i = 2 \cdot y_{i-1} - y_{i-2} + x_{i-1} \cdot T_1 \cdot (1 - \text{EXP}[-T_u/T_{\text{жс}}]) / K_o + x_{i-2} \cdot (\text{EXP}[-T_u/T_{\text{жс}} - T_u/T_2] - \text{EXP}[-T_u/T_2]) / K_o.$$

Аналогично рассчитаем регулятор, управляющий изменением тока в индукторе согласно  $I_{cs}(t)$ -сценарию:

$$W_{01}(p) = K_{01} \cdot (1 + T_1 \cdot p);$$

$$\begin{aligned} W_{01}(z) &= Z\{W_{01}(p) \cdot W_{\text{я}}(p)\} = Z\{[K_{01}/(1 + T_1 \cdot p)] \cdot (1 - \text{EXP}(-p \cdot T_u)/p)\} = \\ &= [K_{01} \cdot (z-1)/z] \cdot Z\{1/[(1 + T_1 \cdot p) \cdot p]\} = \\ &= [K_{01} \cdot (z-1)/z] \cdot (z \cdot (1 - \text{EXP}[-T_u/T_1]) / (z-1) \cdot (z - \text{EXP}[-T_u/T_1])) = \\ &= K_{01} \cdot (1 - \text{EXP}[-T_u/T_1]) / (z - \text{EXP}[-T_u/T_1]); \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} W_{rcs} &= y(z)/x(z) = [K_{01} \cdot z^{-2} \cdot (1 - \text{EXP}[-T_u/T_{\text{жс}}]) \cdot (1 - \text{EXP}[-T_u/T_1])] / \\ & \quad / [1 - z^{-1} \cdot (1 + \text{EXP}[-T_u/T_1]) + z^{-2} \cdot \text{EXP}[-T_u/T_1]]; \\ y_i &= y_{i-1} \cdot (1 + \text{EXP}[-T_u/T_1]) - y_{i-2} \cdot \text{EXP}[-T_u/T_1] + \\ & \quad + x_{i-2} \cdot K_{01} \cdot (1 - \text{EXP}[-T_u/T_{\text{жс}}]) \cdot (1 - \text{EXP}[-T_u/T_1]). \end{aligned}$$

$T_u$  выбирается в соответствии с уравнением:  $T_u = T_{ум}/3$ , где  $T_{ум}$  – постоянная времени исполнительного механизма (тиристорного преобразователя). Таким образом,  $T_u = 1$  мс,

$$T_{\text{жс}} = 2 \dots 3 \cdot T_{ум} = 6 \text{ мс.}$$

### 1.1.3.3. Алгоритм работы контура управления током плазмы

Алгоритм работы контура управления током плазмы разработан на основе графика зависимости  $I_{cs}(t)$  и структурной схемы системы цифрового управления источником питания обмотки CS, приведенной в [41].

- Шаг 1. Замыкание ключей  $B_{1.1}-B_{1.8}$  – подключение  $T_{n 1.1}-T_{n 1.16}$  к питающей сети.
- Шаг 2. Замыкание ключа  $K_1$  – подключение обмотки CS к источнику питания.
- Шаг 3. Включение преобразователей  $T_{n 1.1}-T_{n 1.8}$  посредством изменения угла открытия тиристорov  $\alpha$  от  $120^\circ$  до  $0^\circ$ . Производится ввод энергии в обмотку в течение времени  $[t_0...t_1] = 1$  с. Контроль уровня тока. Если  $I_{cs} = I_{cs\ зад} = 30$  кА, то следует перейти к шагу 4.
- Шаг 4. Отключение преобразователей  $T_{n 1.1}-T_{n 1.8}$  путем запираания тиристорov.
- Шаг 5. Замыкание ключа  $K_{1.1}$  – отключение обмотки CS от источника питания.
- Шаг 6. Размыкание ключа  $K_{1.1}$  – разряд обмотки CS на балластное сопротивление  $R_1$ . Снижение тока в обмотке до момента  $U_{CS} = U_{d-cs}^{max}$  за время  $[t_1-t_2]$  с контролем величины напряжения на обмотке CS  $U_{CS} \leq U_{d-cs}^{max}$ . Если  $I_{cs} = I_{cs\ зад} = 0$  кА, то следует перейти к шагу 7.
- Шаг 7. Размыкание ключа  $K_{1.1}$  подключение обмотки CS к источнику питания.
- Шаг 8. Замыкание ключа  $K_1$  – отключение балластного сопротивления  $R_1$ .
- Шаг 9. Включение преобразователей  $T_{n 1.9}-T_{n 1.16}$  посредством изменения угла открытия тиристорov  $\alpha$  от  $120^\circ$  до  $0^\circ$ . Производится ввод энергии в обмотку в течение времени  $[t_2-t_4]$ . Контроль уровня тока в обмотке CS  $I_{cs} = I_{cs\ зад}$  и тока плазмы  $I_p = I_{p\ зад} = 750$  кА, тогда следует перейти к шагу 10.
- Шаг 10. Включение контура регулирования (стабилизации) тока плазмы  $I_p = I_{const}$ .
- Шаг 11. Ожидание команды «конец разряда». Команда «конец разряда» получена, тогда следует перейти к шагу 12.
- Шаг 12. Вывод энергии из обмотки CS в инверсном режиме работы преобразователей  $T_{n 1.9}-T_{n 1.16}$  за время  $[t_4-t_5]$ . Контроль уровня тока; если  $I_{cs} = I_{cs\ зад} = 0$  А, тогда следует перейти к шагу 13.
- Шаг 13. Размыкание ключей  $B_{1.1}-B_{1.8}$  – отключение преобразователей от питающей сети.



### **1.1.4. Контур управления плотностью плазмы**

Система газонапуска (ГНС) является одной из систем, эффективное функционирование которой определяет основные показатели плазменного разряда. В связи с тем, что данная система участвует в процессе формирования и управления плазмой в течение разряда путем стабилизации плотности плазмы и устранения турбулентностей, порядок работы ГНС на стадии разряда заключается в согласованном с системой управления плазмой (СУП) выполнении следующих двух операций:

- программируемого газонапуска, реализуемого подсистемой управления посредством пьезоклапанов К1, К2 (рис. 1.1.4.1) в соответствии с динамикой роста тока плазмы в текущем эксперименте, или динамикой радиационных потерь. При этом в ПСУ ГНС должна быть обеспечена возможность изменения программы управления клапанами К1, К2 в течение разряда с пульта общего управления (ПОУ);
- регулируемого газонапуска, величина и характер которого, задаются контурами автоматического регулирования. На большинстве установок подобного типа реализованы практически независимые контуры регулирования газонапуска по величине плотности электронов плазмы  $n_e$  и величине, огибающей второй моды МГД-активности  $B_{2\text{МГД}}$ , регулируемый напуск газа в которых выполняется быстродействующими пьезоклапанами, установленными на корпусе установки. Таким образом, в качестве одного из возможных вариантов обеспечения регулируемого газонапуска на КТМ предлагается использовать коррекцию программы изменения  $Q_{\text{H}_2}$ ,  $Q_{\text{D}_2}$ .

Работа отмеченных выше двух контуров регулирования газонапуска, как показали эксперименты на установке, в целом одинакова и заключается в следующем. Сигналы обратной связи – электронная плотность ( $n_e$ ) плазмы и величина огибающей второй моды МГД-активности ( $B_{2\text{МГД}}$ ) – измеряются в соответствующих системах физической диагностики КТМ. Полученные сигналы сравниваются с задающими функциями – требуемым изменением величины электронной плотности и развитием огибающей второй моды в течение проводимого разряда. Полученные разности между заданным и фактическим значениями по причине инерционности процессов обрабатываются по ПИД-закону регулирования. И по результатам обработки производится управление соответствующими пьезоклапанами. Усиление потока газа увеличивает значение электронной плотности и амплитуду огибающей вто-

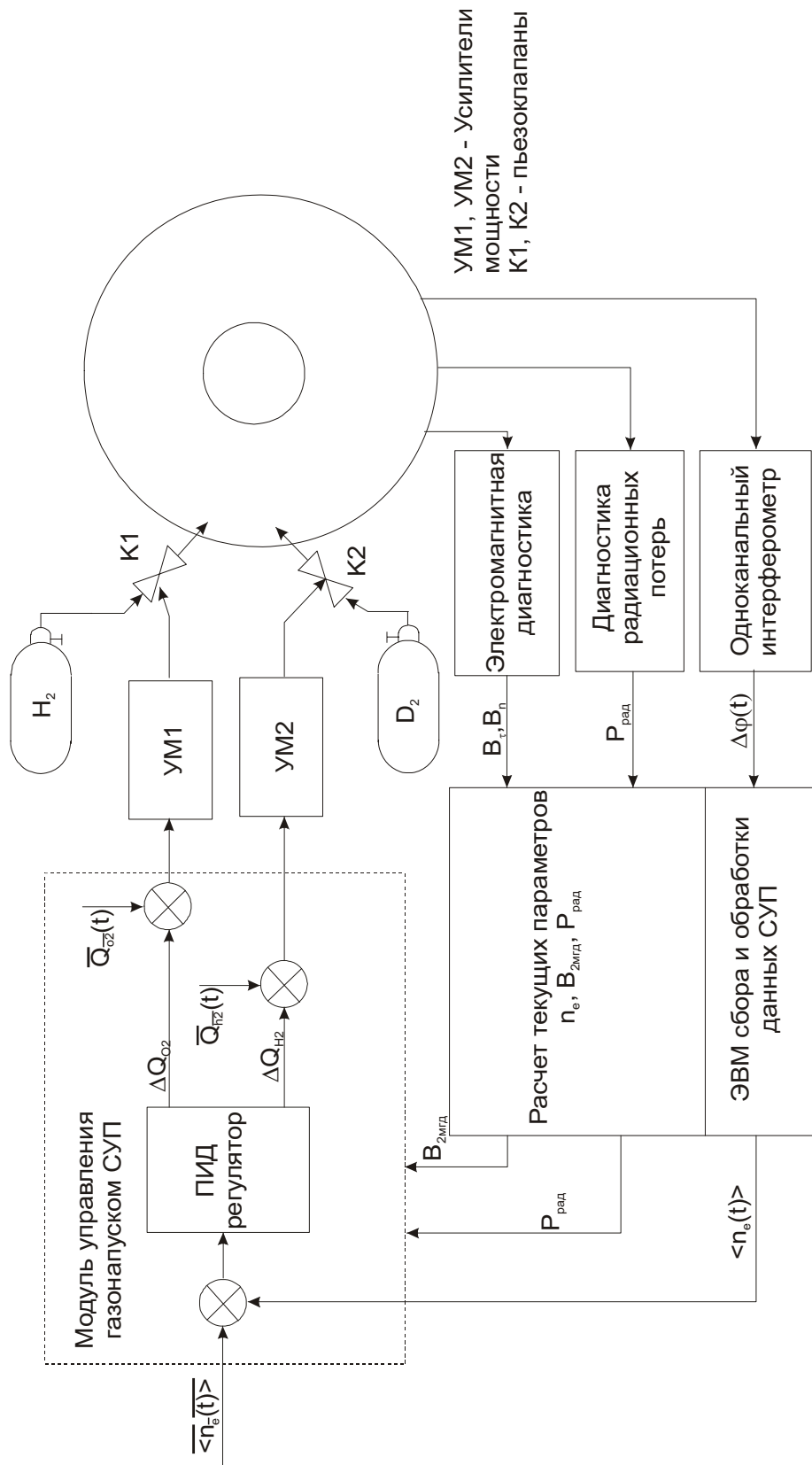


Рис. 1.1.4.1. Структура контура управления плотностью плазмы

рой моды, а уменьшение потока газа (вплоть до отключения) приводит к снижению электронной плотности за счет потери частиц из плазмы и уменьшению амплитуды огибающей второй моды. При этом задача оптимизации контуров регулирования сводится к правильному выбору задающих функций и настроек регуляторов: постоянных времени интегрирования и дифференцирования, общих коэффициентов усиления.

Для корректного определения закона регулирования необходимо иметь математическое описание всех элементов контура управления. Запишем передаточную функцию пьезоклапана:

$$W_K(p) = \frac{G(p)}{\Delta U_K(p)} = \left[ \frac{k_{\kappa 1}}{T_{\kappa 2}^2 p^2 + T_{\kappa 1} p + 1} + \frac{k_{\kappa 2}}{T_{\kappa 3}^2 p^2 + T_{\kappa 4} p + 1} \right] e^{-p\tau_{\kappa}}, \quad (1.1.4.1)$$

где  $T_{\kappa 1,2,3,4}$  – постоянные времени;  $k_{\kappa 1,2}$  – размерные коэффициенты;  $\tau_{\kappa}$  – запаздывание.

#### 1.1.4.1. Измерение средней плотности электронов

Измерение интегральной плотности электронов в плазме термоядерных установок типа ТОКАМАК в реальном масштабе времени традиционно выполняется с использованием одноканального интерферометра. Принцип действия интерферометра основан на выделении фазового сдвига, который претерпевает зондирующее излучение при его распространении через плазму. Фазовый сдвиг пропорционален интегральной плотности электронов, которая используется в системе управления в контурах управления газонапуском и формой плазмы в реальном масштабе времени. Выполнение функций измерения при этом осуществляется подсистемой сбора данных одноканального интерферометра.

Аппаратная реализация подсистемы диагностики приведена в техническом проекте ИИС КТМ.

При обработке данных требуется выполнить реконструкцию профиля плотности электронов. Плотность электронов пропорциональна показателю преломления, который в свою очередь связан с измеряемой задержкой в распространении зондирующего СВЧ-излучения соотношением:

$$\varphi(\omega) = 2 \frac{\omega}{c} \int_{x_0}^{x_c} N(\omega, x) dx + \varphi_0(\omega), \quad (1.1.4.1)$$

где  $\varphi(\omega)$  – сдвиг фазы зондирующего излучения;  $N(\omega, x)$  – показатель преломления плазмы.

Для системы управления не нужна высокая точность реконструкции профиля плотности электронов, но требуется очень высокая скорость обработки данных. В соответствии с этим, предварительно для выполнения обработки был выбран простой алгоритм реконструкции.

Согласно этому алгоритму, интегрирование в уравнение (1) заменяется суммированием и при выполнении подстановок  $dx = x_j - x_{j-1}$ ,  $N_i = (N_{i,j} + N_{i,j-1})/2$ ,  $\varphi_0(w) = 0$ , преобразуется к виду:

$$\varphi_i = 2 \frac{\omega_i}{c} \sum_{j=0}^{j=i} N_{i,j} \cdot dx_j = 2 \frac{\omega_i}{c} \sum_{j=0}^{j=i} \frac{(N_{i,j} + N_{i,j-1})}{2} \cdot (x_j - x_{j-1}). \quad (1.1.4.2)$$

Подставляя  $A_{i,j} = \frac{w(N_{i,j} + N_{i,j-1})}{c \cdot 2}$  в выражение (1.1.4.2), получим

$$\varphi_i = \sum_{j=1}^{j=i} A_{i,j} (x_j - x_{j-1}). \quad (1.1.4.3)$$

Запишем формулу (1.1.4.3) в матричной форме:

$$\varphi = A \cdot X. \quad (1.1.4.4)$$

Значения  $X$  находятся путем инвертирования (1.1.4.4):

$$X = A^{-1} \cdot \varphi = (A/D_A) \cdot \varphi,$$

где  $A^{-1}$  – обратная матрица;  $D_A$  – определитель матрицы  $A$ .

Приведенный алгоритм является достаточно простым в реализации и может быть использован для реконструкции профиля в реальном масштабе времени.

### **1.1.5. Контур управления ВЧ-нагревом плазмы**

#### **1.1.5.1. Расчёт скорости ввода ВЧ-энергии в плазму КТМ**

Эффективность нагрева плазмы в ТОКАМАКе определяется временем передачи ВЧ-энергии плазме. Оно должно быть меньше времени удержания энергии группой нагреваемых частиц. Из этого условия можно найти максимально допустимую длительность фронта ВЧ-импульса, при которой энергосодержание плазмы будет оставаться на том же уровне, что и на момент начала ввода ВЧ-энергии. Энергия, вводимая в плазму за интервал времени, определяется как

$$\int_0^{\tau_{Ei}} P(t) dt = W_p. \quad (1.1.5.1)$$

Предполагая, что закон изменения мощности линейный, можно записать следующее выражение:

$$P(t) = \frac{P_{\max}}{t_{cp}} t. \quad (1.1.5.2)$$

Тогда выражение для максимальной длительности фронта, определяемой равенством вводимой за время  $\tau_{Ei}$  ВЧ-энергии и энергии, запасённой в плазме на момент начала ВЧ-импульса, будет иметь вид

$$t_{\Phi P} = \frac{P_{\max} \tau_{Ei}^2}{2W_p} = 0,106 \text{ с.}$$

С точки зрения нагрева плазмы нас интересуют величины запасённой в группе ионов и в группе электронов энергии ( $W_I$  и  $W_p$ , соответственно), называемые энергосодержанием частиц (или плазмы), и время удержания этой энергии.

Энергосодержание ионов и электронов можно найти, используя уравнения энергетического баланса плазмы в ТОКАМАКе в стационарных состояниях:

$$W_I = \frac{(P_{OH} + \gamma_e P_{RF}) \tau_{Ee} \tau_{Ei} + \gamma_i P_{RF} \tau_{Ei} (\tau_{Ee} + \tau_{ei})}{\tau_{Ee} + \tau_{Ei} + \tau_{ei}}; \quad (1.1.5.3)$$

$$W_e = \frac{(P_{OH} + \gamma_e P_{RF}) \tau_{Ee} (\tau_{Ei} + \tau_{ei}) + \gamma_i P_{RF} \tau_{Ee} \tau_{Ei}}{\tau_{Ee} + \tau_{Ei} + \tau_{ei}}, \quad (1.1.5.4)$$

где  $P_{OH}$  – мощность омического нагрева, 1 МВт;  $P_{RF}$  – мощность дополнительного нагрева, 5 МВт;  $\tau_{Ee}$  – усреднённое время удержания энергии электронов, учитывающее транспортные потери, связанные с теплопроводностью, диффузией и потерями на излучения. По модельным расчётам, проведённым в процессе эскизного проектирования ТОКАМАКа КТМ,  $\tau_{Ee} = 41,9$  мс [41], где  $\tau_{ei}$  – время столкновительного обмена энергиями между ионами и электронами. Эту величину можно определить по формуле:

$$\tau_{ei} = \frac{6,7 \cdot 10^{11} A_i T_e^{3/2}}{n_e} = \frac{6,7 \cdot 2 \cdot 10^{11} \cdot \sqrt{0,557^3}}{0,5 \cdot 10^{17}} = 11 \text{ мкс}, \quad (1.1.5.5)$$

где  $\tau_{Eei}$  – усреднённое время удержания энергии ионов, которое было получено из расчётов на математической модели, равное 42,2 мс.

Учитывая значения этих величин, получим теоретические (ожидаемые) значения энергосодержания ионов и электронов в плазме КТМ:

$$W_I = 0,1256 \text{ МДж и } W_E = 0,1262 \text{ МДж.}$$

Таким образом, эффект от работы установки ВЧ-нагрева плазмы в КТМ можно достичь только с длительностью нарастания фронта не более 0,106 с до максимального уровня мощности  $P_{\max} = 5$  МВт.

### 1.1.5.2. Анализ процессов поглощения и распространения волн в плазме КТМ

Простейший анализ распространения волн в ТОКАМАКе при ИЦР-нагреве можно провести рассматривая рассеивание электромагнитных волн в бесконечной плазме, на которую действует однородное магнитное поле  $B_z$ . Такое приближение описывается дисперсионным уравнением, которое имеет вид

$$\tilde{A}_4 n_x^4 - \tilde{A}_2 n_x^2 + A_0 = 0, \quad (1.1.5.6)$$

где  $n_x$  – показатель преломления волны.

Из уравнения (1.1.5.6) следует, что существует два его решения, различающихся показателем преломления. Запишем уравнение (1.1.5.6) в развёрнутом виде:

$$n_{x1}^2 = \frac{(S - n_z^2) - D^2}{S - n_z^2}; \quad (1.1.5.7)$$

$$n_{x2}^2 = \frac{P(S - n_z^2)}{S}, \quad (1.1.5.7a)$$

где  $n_{x1}$  и  $n_{x2}$  – показатели преломления, соответственно, быстрых магнитозвуковых (БМЗВ) и медленных (так называемых, косых ленгмюровских) волн;  $n_z$  – коэффициент отражения для волн, распространяющихся параллельно (рис. 1.1.5.1) магнитному полю  $B_z$ .

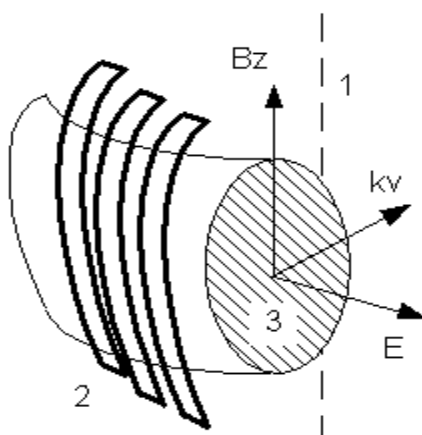


Рис. 1.1.5.1. Излучение электромагнитной волны с внешней стороны рабочей камеры ТОКАМАКа: 1 – главная ось ТОКАМАКа; 2 – проводники высокочастотного тока, входящие в состав антенны; 3 – плазменный шнур;  $E$  – вектор напряжённости электрического поля;  $B$  – вектор напряжённости магнитного поля;  $kv$  – волновой вектор электромагнитной волны;  $kv = c/\lambda$ , направление которого совпадает с направлением распространения электромагнитной волны

В уравнении (1.1.5.7а) были использованы обозначения:

$$\begin{aligned}
 S &= 1 - \sum_i \frac{\omega_{pi}^2}{\omega^2 - \omega_{ci}^2}; \\
 D &= \sum_i \frac{\omega \omega_{pi}^2}{\omega_{ci}(\omega^2 - \omega_{ci}^2)}; \\
 P &= 1 - \frac{\omega_{pe}^2}{\omega^2},
 \end{aligned}
 \tag{1.1.5.8}$$

где  $i$  и  $e$  – индексы, которые обозначают принадлежность к ионам или электронам;  $\omega_{pi}$  – плазменная частота ионов, которая может быть найдена из следующего выражения:

$$\omega_{pi} = \sqrt{4\pi \cdot n_i \cdot e^2 / m_i},
 \tag{1.1.5.9}$$

где  $n_i$ ,  $m_i$  и  $e$  – концентрация, масса ионов и элементарный заряд соответственно;  $\omega_{ci}$  – циклотронная частота ионов;  $\omega_{pe}$  – плазменная частота электронов;  $\omega$  – рабочая частота генератора.

Уравнения (1.1.5.1)–(1.1.5.9) получены со следующими допущениями:

1. Не учитываются эффекты, связанные с конечностью температуры частиц.
2. Не учитываются эффекты, связанные с тороидальной геометрией ТОКАМАКа (рис. 1.1.5.2). Они дают достаточно точное описание распределения волн по радиальному сечению плазмы показана заштрихованной областью на рис. 1.1.5.2 и позволяют выделить две основные проблемы ионно-циклотронного нагрева:
  - определение места, где происходит передача энергии в шнур плазмы;
  - определение потерь энергии, связанных с локальным поглощением волн.

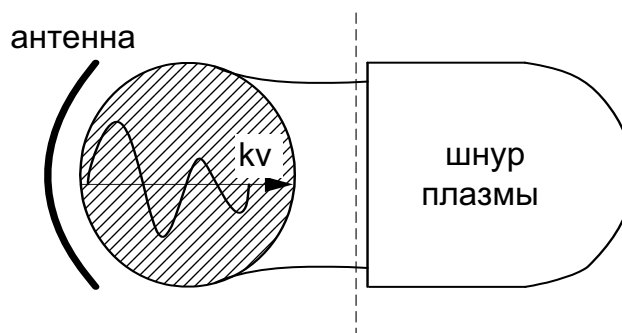


Рис. 1.1.5.2. Излучение волны в тороидальный тор плазмы

Решение первой проблемы позволяет создавать направленные антенны, при помощи которых можно менять место ввода основной доли ВЧ-энергии в плазму ТОКАМАКа. Для устранения второй проблемы разрабатываются специальные алгоритмы ввода дополнительной энергии с привязкой момента ввода к параметрам плазмы и её положению.

В режиме ионно-циклотронного нагрева перенос энергии от антенны к плазме обусловлен, в основном, БМЗВ. Возникновение быстрых волн обусловлено набором высокочастотных токов, протекающих в антенне, ориентированных вдоль главного радиуса ТОКАМАКа (рис. 1.1.5.1) и расположенных в периферийной области тора, где плотность плазмы ниже. Естественно, до того, как ВЧ-энергия достигнет места поглощения (места возникновения быстрых волн), она должна пересечь пограничную область плазмы, где происходит локальное поглощение электромагнитной энергии. Передача энергии через этот слой, в основном, и определяет сцепление антенны с плазмой. Необходимо выделить следующие возможности улучшения сцепления антенны с плазмой:

1. Необходимо обеспечить маленькое расстояние между границей плазмы и участками антенны, где протекают высокочастотные токи.
2. Необходимо выбрать антенны, способные генерировать БМЗВ в полоидальном (в радиальном сечении) и тороидальном (по обходу плазменного шнура) направлениях.

ВЧ-поле, создаваемое антенной, обуславливает небольшое изменение траекторий движения частиц. Это можно объяснить следующими причинами:

- во-первых, значение высокочастотного магнитного поля намного меньше, чем значение постоянного, в нашем случае  $B_0 = 1,5$  Тл;
- во-вторых, сила электрического ВЧ-поля действует на ионы намного меньше величины  $[v B_0]$ , связанной с тепловым движением ионов;
- возмущение движения частиц в направлении, параллельном магнитному полю, также мало.

Запишем уравнение движения частиц, причём разделим скорость частиц, обусловленную постоянным магнитным полем  $B_0$  и переменным полем  $B$ , создаваемым ВЧ-генератором и антенной:

$$m \left( \frac{dv_0}{dt} + \frac{dv}{dt} \right) = Z_e (E + v_0 B_0 + v_0 B + v B_0 + v B). \quad (1.1.5.10)$$

Здесь можно выделить часть, обусловленную постоянной составляющей:



$$m \frac{dv_0}{dt} = Z_e v_0 B_0. \quad (1.1.5.11)$$

Решение этого уравнения имеет вид:

$$v_0(t) = v_0(0) t^{-i\omega_c t}, \quad (1.1.5.12)$$

где  $\omega_c = Z_e \frac{B_0}{m}$  (1.1.5.13) – циклотронная частота ионов, которая зависит только от постоянного магнитного поля, массы одного иона и элементарного заряда. В отличие от плазменной частоты ионов (4), она не зависит от плотности, поэтому остается постоянной при любых режимах работы ТОКАМАКа.

Подставим уравнение (1.1.5.11) в уравнение (1.1.5.10):

$$m \frac{dv}{dt} = Z_e (E + v_0 B + v B_0 + v B). \quad (1.1.5.14)$$

Анализ этого выражения показывает, что траектория движения частиц при ВЧ-нагреве не меняется, а меняется скорость их закручивания по спирали вокруг направления вектора напряжённости постоянного магнитного поля  $B_0$  (рис. 1.1.5.3).

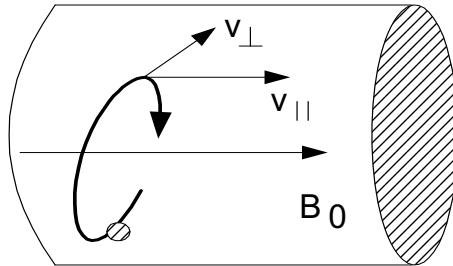


Рис. 1.1.5.3. Движение иона в магнитном поле ТОКАМАКа

Из рассмотренного можно сделать следующие выводы:

- с целью уменьшения нежелательного поглощения энергии дополнительного нагрева на периферии плазмы необходимо использовать направленную антенну, которая позволит подводить ВЧ-энергию непосредственно к области циклотронного резонанса, причём параметры антенны (прежде всего её геометрические размеры) должны быть такими, чтобы под действием ВЧ-поля антенны в плазме ТОКАМАКа инициировались быстрые магнитозвуковые волны.
- Расстояние от антенны до границы плазменного шнура должно быть минимальным и определяться, очевидно, только из соображений безопасности работы антенны.

- Частота работы системы должна быть равна циклотронной частоте нагреваемых частиц; в случае ТОКАМАКа КТМ – циклотронной частоте дейтерия (ионы малой добавки). При постоянном магнитном поле  $B = 1,5$  Тл циклотронная частота  $\omega = 13$  МГц.

### 1.1.5.3. Влияние примесей на нагрев плазмы

В экспериментах по ВЧ-нагреву в области ионно-циклотронных частот наблюдается повышенное, по сравнению с другими способами дополнительного нагрева, выделение примесей. При этом, вследствие больших потерь на излучение, нагрев замедляется или даже сменяется остыванием плазмы. В конечном итоге может даже возникнуть неустойчивость срыва и разряд прекратиться.

Увеличение потока примесей при ВЧ-нагреве связано с активизацией взаимодействия периферийной плазмы с поверхностью антенны и камеры. В настоящее время наиболее действенной мерой, направленной на уменьшение радиационных потерь, является замена металлических поверхностей внутренней части вакуумной камеры ТОКАМАКа на углеродные. Однако и после принятия таких мер радиационные потери в современных термоядерных установках всё же составляют десятки процентов от вводимой мощности. Одной из возможных причин усиления взаимодействия периферийной плазмы с поверхностью при ВЧ-нагреве является повышение электронной температуры этой плазмы, влекущее за собой рост скачка потенциала в переходном слое плазма–стенка и соответствующий рост энергии ионов, выносимых на стенку. Наряду с этим при ВЧ-нагреве в области низких частот могут существовать специфические, присущие именно этому способу нагрева, механизмы, приводящие к возникновению направленных потоков заряженных частиц на поверхность. О существовании примесей и их заметном влиянии на поведение периферийной плазмы и эффективность ВЧ-нагрева в ТОКАМАКах свидетельствуют многие экспериментальные факты. На рис. 1.1.5.4 показано типичное поведение температуры дейтронов и электронов на ТОКАМАКе TEXTOR (ФРГ) во время ВЧ-импульса.

Два наблюдения, приведённые на рис. 1.1.5.4, имеют одинаковые стадии: быстрое нарастание температуры, когда прикладывается ВЧ-мощность, пик приходится на 30...35 мс для дейтронов и на 20...25 мс для электронов, затем следует значительный спад.

Таким образом, анализ данных, полученных при измерениях характеристик плазмы в процессе ввода ВЧ-энергии на действующих ТО-

КАМАКах (TFTR, TEXTOR, Tore Supra и др.), позволяет сделать следующие принципиальные заключения:

- эффективная  $W_{\text{эфф}}$  энергия, поглощённая за весь период ВЧ-импульса, начиная с момента нарастания полоидального давления плазмы, составляет ~60 % от общей энергии  $W_g$ , переданной генератором. Около 20 % разницы между  $W_g$  и  $W_{\text{эфф}}$ , очевидно, является результатом потерь в передающих линиях и в антенне. А оставшаяся часть разницы, т. е. около 80 %, должна быть отнесена к различным механизмам, имеющим место в пограничной плазме (выделение примесей и уход частиц), которые не способствуют увеличению давления плазмы.
- Общее энергосодержание  $W_p$ , т. е. величина общей запасённой энергии частиц, растёт линейно до достижения максимума полоидального давления  $\beta_p$ , затем быстро спадает (рис. 1.1.5.4).
- Длительность ВЧ-импульса и его переднего и заднего фронтов должна определяться режимом нагрева, при этом максимальная длительность ограничивается временем эффективного нагрева, в течение которого потери энергии на излучение частицами примесей меньше, чем вводимая энергия.

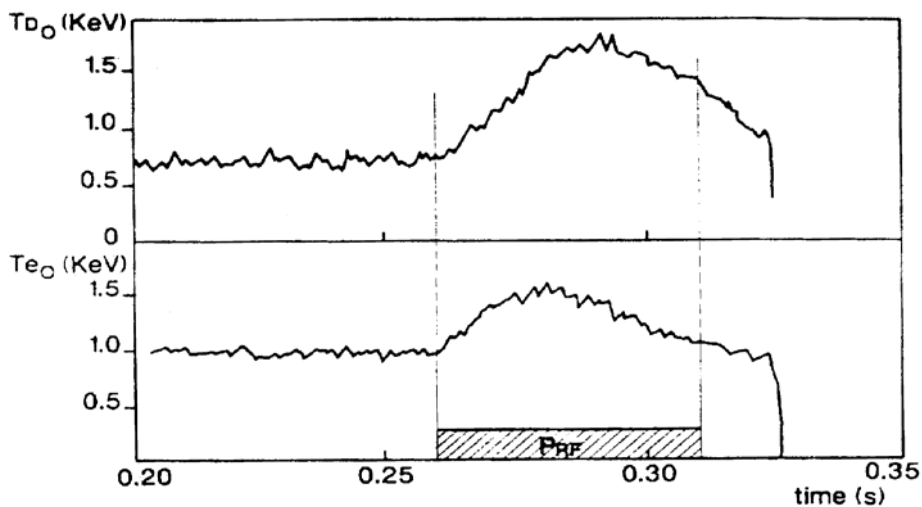


Рис. 1.1.5.4. График изменения температуры электронов и дейтронов во время ВЧ-разряда

Большое количество требований, накладываемых на ВЧ-импульс вводимой энергии, приводит к необходимости создания сложной системы управления установкой ВЧ-нагрева, способной выполнять задачи управления установкой и взаимодействия с другими системами ТО-КАМАКа.

#### 1.1.5.4. Структурная схема установки ВЧ-нагрева плазмы ТОКАМАКа КТМ

В эскизном проекте на казахстанский материаловедческий ТОКАМАК КТМ предложена схема ИЦР-нагрева, работающая в автогенераторном режиме. Особенностью этой схемы является то, что антенный блок и вносимый плазмой импеданс являются основными частями сложного распределённого колебательного контура, в котором происходит самовозбуждение колебаний на одной из собственных частот цепи.

Структура автогенераторной системы ИЦР-нагрева показана на рис. 1.1.5.5. Электрическая энергия из питающей сети преобразуется в ВЧ-энергию с помощью усилительной схемы (ВЧ-генератора), выполненной на основе триодных ламп высокой мощности ГУ-88А, управляемой импульсным источником питания автогенератора (ИАП) с регулируемыми параметрами (амплитуда, длительности импульса и его фронтов). От выхода усилительной схемы по коаксиальным кабельным линиям ВЧ-энергия передаётся от каждого генератора к своей антенне.

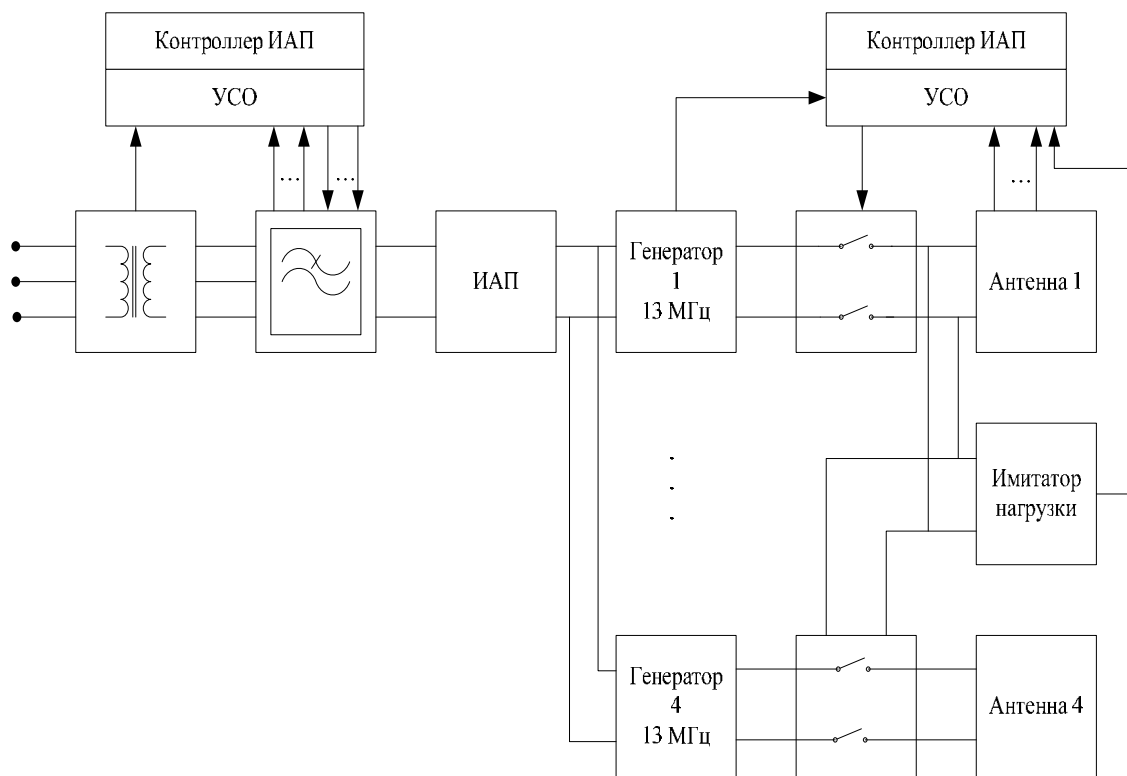


Рис. 1.1.5.5. Функциональная схема установки ИЦР-нагрева ТОКАМАКа КТМ

В отличие от систем с задающим маломощным ВЧ-генератором, такая схема позволяет добиться следующих преимуществ:

- очень высокий полный КПД (около 80 %);
- быстрое изменение параметров ВЧ-импульса в процессе ввода;

- автоматическая самоподстройка частоты;
- компьютерный контроль общих параметров системы.
- автоматическое управление согласованием с нагрузкой.

#### 1.1.5.5. Алгоритм ввода ВЧ-мощности в плазму ТОКАМАКа КТМ

Работа подсистемы ИЦР-нагрева должна быть организована таким образом, чтобы обеспечивать надёжный ввод ВЧ-мощности в плазму, её устойчивость к аварийным ситуациям. Этим требованиям отвечает алгоритм, представленный на рис. 1.1.5.6.

#### 1.1.5.6. Подсистема управления ВЧ-нагревом плазмы в ТОКАМАКе КТМ

В простейшем случае момент ввода ВЧ-мощности в плазму определяется по заданной задержке относительно начала плазменного разряда, но такое решение обычно обеспечивает недостаточно высокий КПД ВЧ-системы. Более обоснованным является ввод мощности на основе измерения тока плазмы  $I_p$ , а также определения конфигурации плазменного шнура и его расположения относительно антенны. На практике это может быть достигнуто путём реализации достаточно интеллектуальной системы управления, обеспечивающей синхронизацию работы ВЧ-генератора с другими системами ТОКАМАКа. Кроме того, для контроля за работой установки необходимо получать информацию о переданной в плазму ВЧ-мощности. Этого можно добиться измеряя значения проходящей и отражённой мощности в каждом из фидерных трактов передачи энергии от генераторов к антеннам и контролируя энергосодержание плазмы.

Система управления ИЦР-нагревом должна осуществлять следующие функции:

1. Выполнение алгоритмов измерения, контроля и регистрации рабочих параметров ВЧ-генератора и ИАП, при этом должны измеряться следующие параметры:
  - величины проходящей к антеннам  $P_{in}$ , и отражённой 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  $f_g$ .

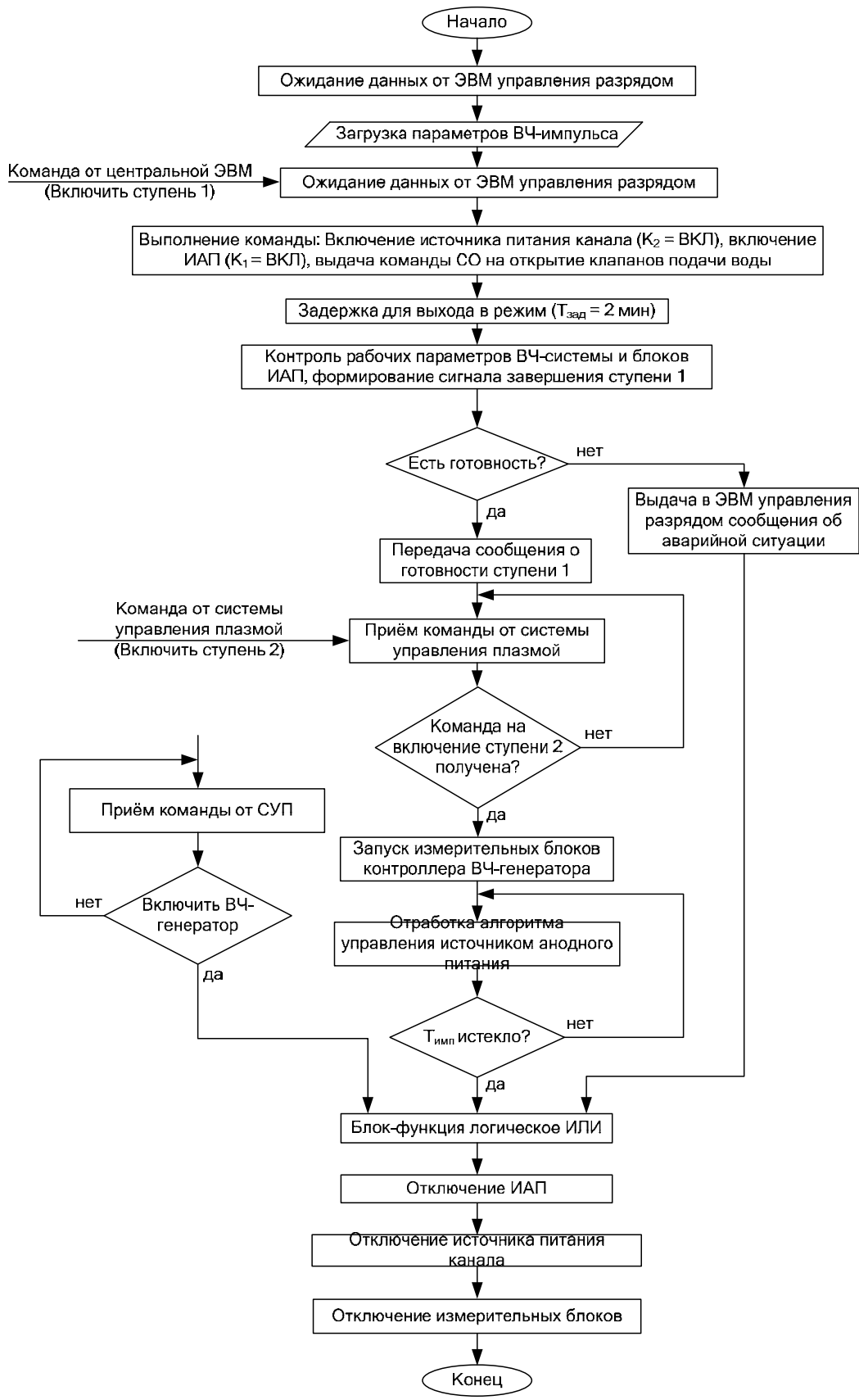


Рис. 1.1.5.6. Алгоритм работы установки ИЦР-нагрева

2. Обеспечение дистанционного управления блоком ИАП и блоком питания накала, куда входит задание параметров ВЧ-импульса: амплитуды  $U_{имп}$ , длительности импульса  $T_{имп}$  и длительности фронта импульса  $T_{фр}$ , а также контроль, формирование и выдача сигналов на включение и выключение исполнительных механизмов силовых переключателей.
3. Защита ВЧ-генератора и ИАП от повреждений, которые могут возникнуть при росте величины отраженной мощности, перегреве анодной чашки или при возникновении электродугового пробоя в цепях генератора и фидерных трактах.
4. Выполнение алгоритмов обработки информации, получаемой от измерительных устройств ВЧ-системы.
5. Калибровка ВЧ-системы.

Предлагаемая система управления ИЦР-нагревом плазмы, структурная схема которой показана на рис. 1.1.5.7, построена на двух промышленных контроллерах: контроллере ИАП и контроллере ВЧ-генератора.

Задачами контроллера ИАП являются:

- выполнение процедуры включения ИАП;
- взаимодействие с контроллером ВЧ-генератора;
- формирование управляющих воздействий, определяющих уровень выходного напряжения ИАП;
- контроль параметров источника анодного питания;
- выполнение процедуры отключения ИАП и источника питания накала (в том числе и аварийного отключения).

Задачами контроллера ВЧ-генератора являются:

- взаимодействие с контроллером ИАП;
- измерение параметров ВЧ-генератора (в рабочем режиме и режиме калибровки);
- формирование сигналов аварийного отключения;
- синхронизация ВЧ-системы с другими системами ТОКАМАКа КТМ;
- подключение и отключение имитатора нагрузки.

Функциональная схема установки ВЧ-нагрева представлена на рис. 1.1.5.8.

Все измеряемые и управляемые параметры сведены в табл. 1.1.5.1 и 1.1.5.2.

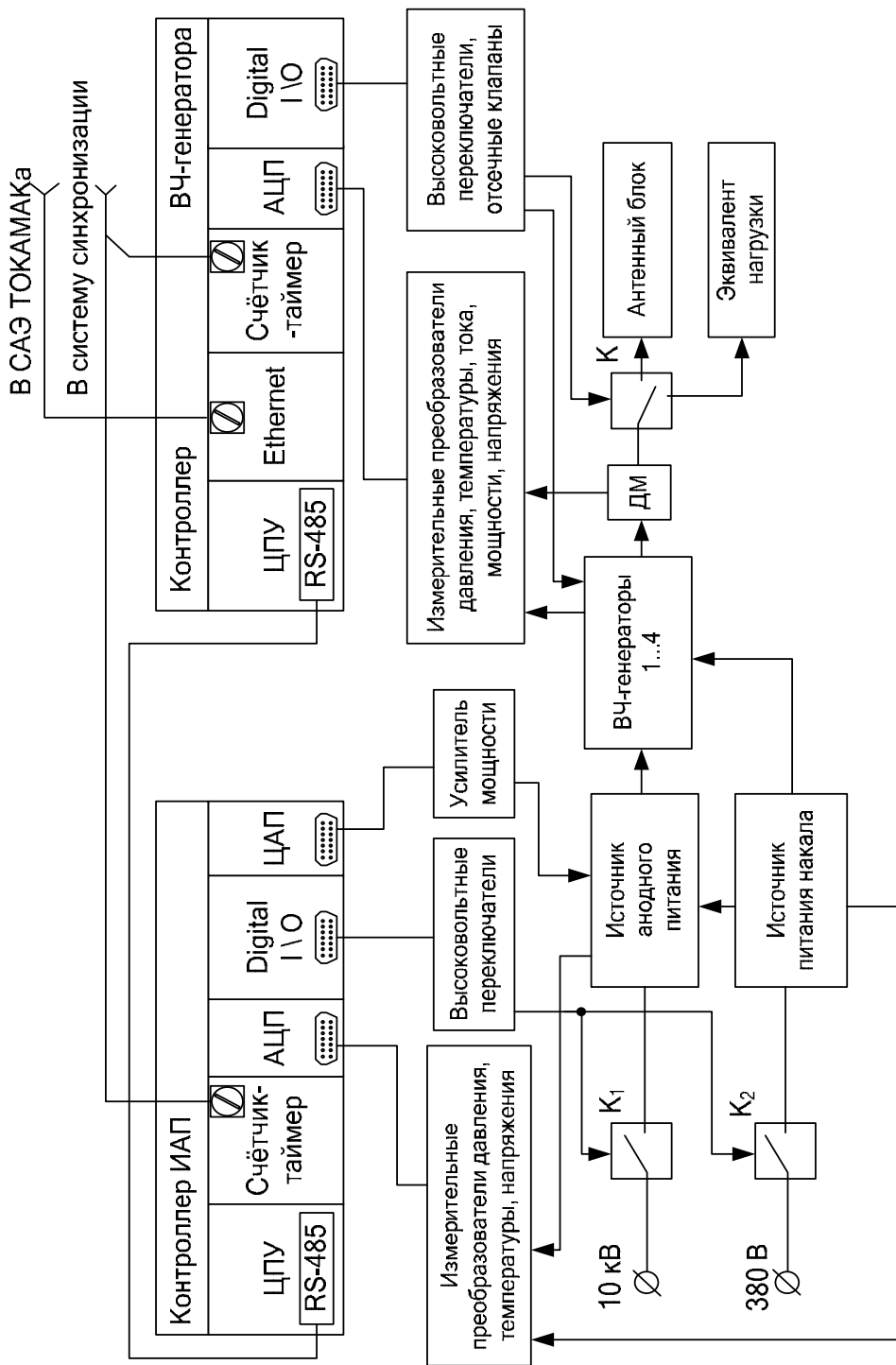


Рис. 1.1.5.7. Структурная схема системы управления установкой ИЦР-нагрева



Таблица 1.1.5.1

## Состав точек контроля

№	Наименование	Шт.	Диапазон	Динамические характеристики	Погрешность, %	Первичный преобразователь
<b>Источник анодного питания</b>						
157a	Напряжение на выходе источника питания	1	0...20 кВ	20 кВ/мс	3	ОДН
3a...4a	В питающей сети	2	0...10 кВ	–	3	Трансформатор напряжения
67a...96a	Выходное напряжение модуля	30	0...1 кВ	1 кВ/мс	3	ОДН+ Пиковый детектор
1a...2a	Частота колебаний питающей сети	3×2	0...300 Гц	–	1	Демпфированный ЕДН
37a...66a	Выходной ток модуля	30	0...200 А	200 А/мс	3	Датчик холла
158a	Ток на выходе источника питания	1	0...200 А	200 А/мс	3	Датчик холла
5a...6a	Температура трансформатора	2			3	Термометр-сопротивление
7a...36a	Температура радиаторов (диодов)	30	0...200 °С	–	3	Термометр-сопротивление
97a...127a	Температура IGBT-транзисторов	30	0...100 °С	–	3	Термометр-сопротивление
127a...157a	Температура диодов	30	0...200 °С	–	3	Термометр-сопротивление
<b>ВЧ-генератор</b>						
<b>Постоянная составляющая</b>						
159a...166a	Ток анода	4 2	0...150 А	120 А/мс	1	Датчик Холла
211a...218a	Ток катода	4 2	0...700 А			Датчик Холла
175a...190a	Проходящая мощность	16	0...1 МВт	1 МВт/мс	1,5	Направленный ответвитель+термистор
191a...206a	Отражённая мощность	16	0...1 МВт	1 МВт/мс	1,5	Направленный ответвитель+термистор
207a...210a	Пиковое напряжение на антенне	4×1	0...15 кВ	15 кВ/мс	1	ОДН+Пиковый детектор
167a...174a	Частота генерации	4×1	0...30 МГц	–	1	Демпфированный ЕДН
223a	Расход воды в эквиваленте нагрузки	1	0...10 м <sup>3</sup> /ч	–	–	Расходомер
<b>Температура воды:</b>						
224a	На входе в ЭН	1	0...100 °С	–	3	Термометр-сопротивление
225a	На выходе из ЭН	1	0...100 °С	–	3	Термометр-сопротивление

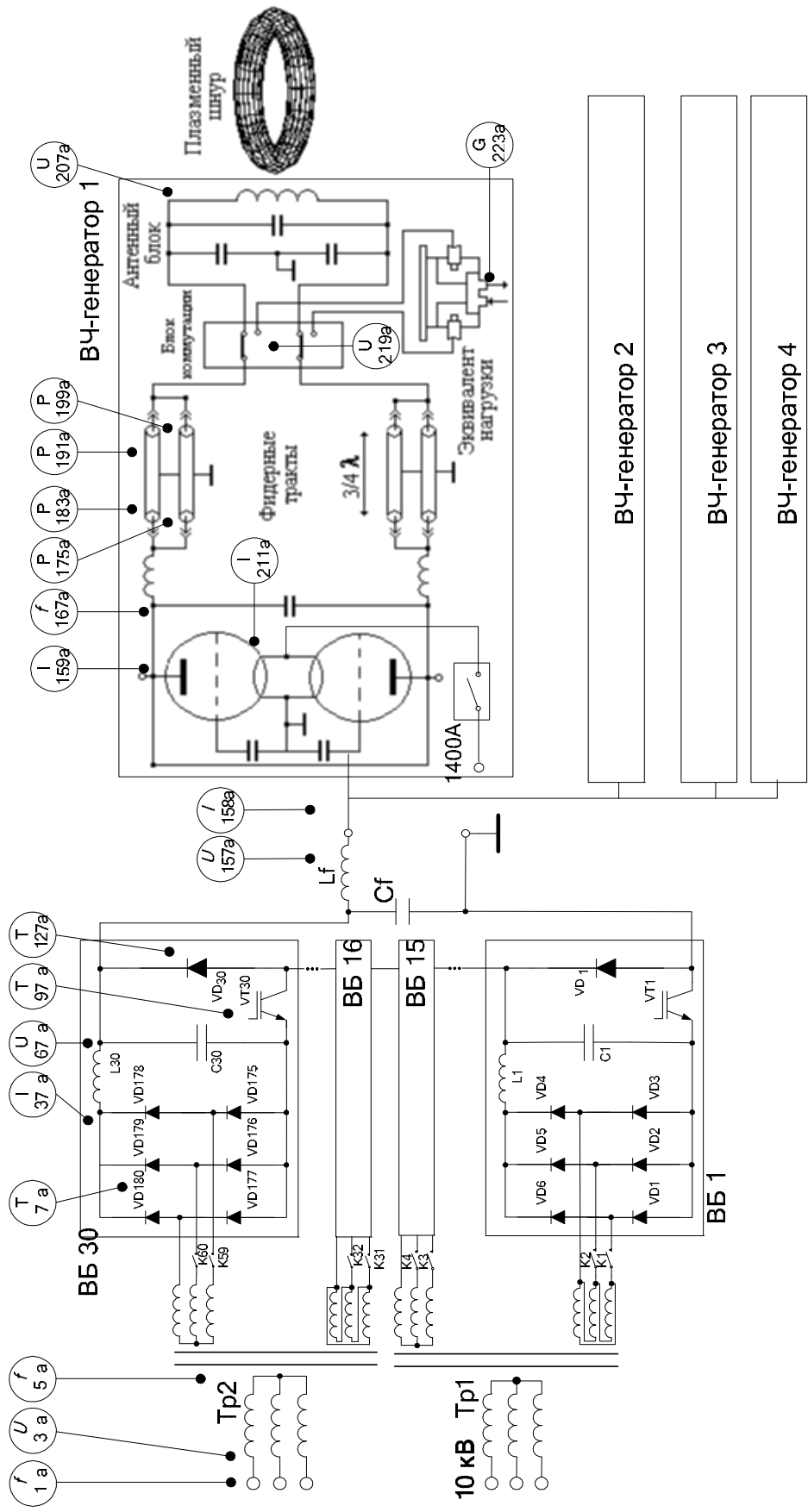


Рис. 1.1.5.8а. Функциональная схема автоматизации установки ИЦР-нагрева плазмы ТОКАМАКА КТМ (ИАП для модульной структуры)

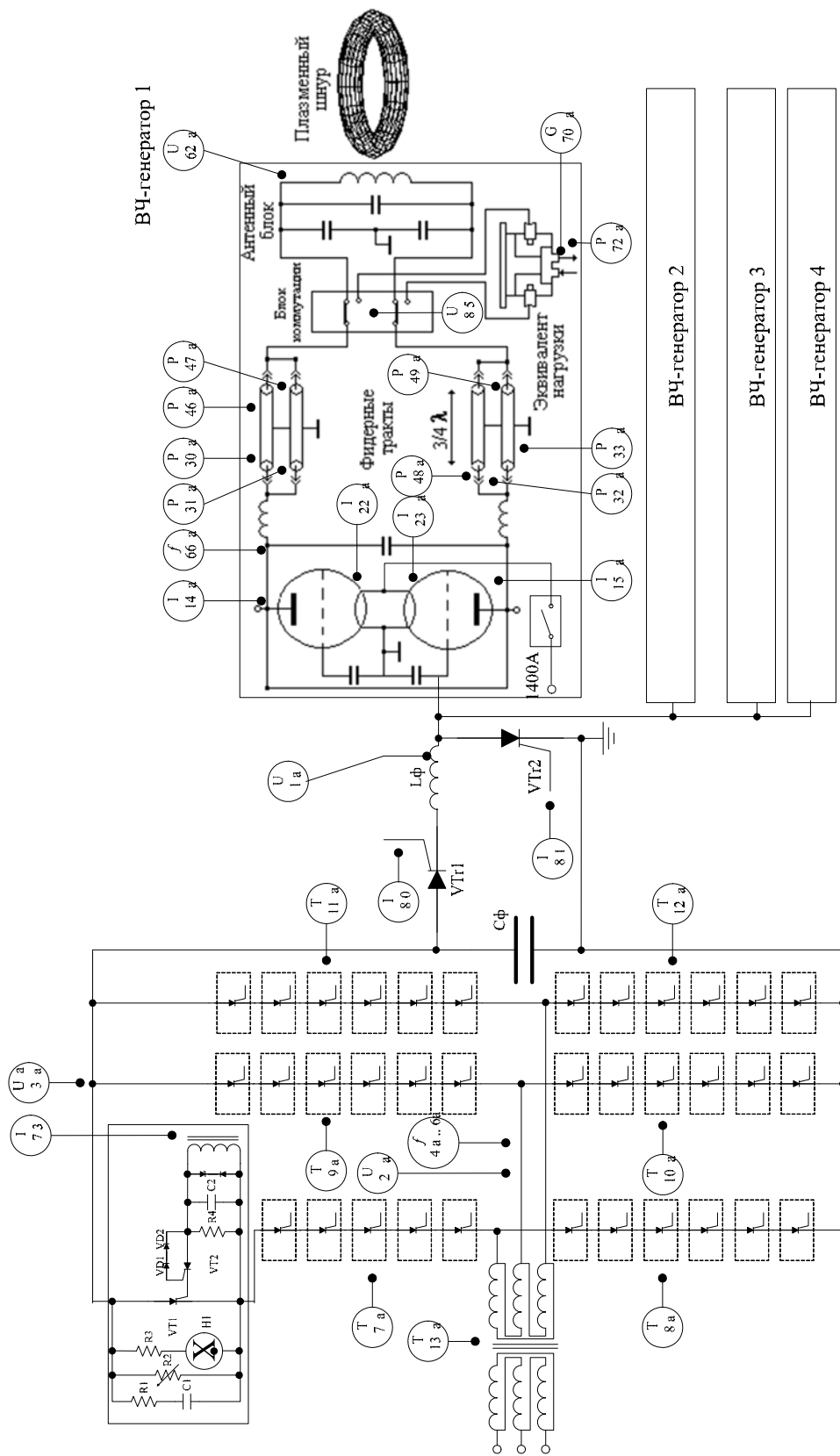


Рис. 1.1.5.86. Функциональная схема автоматизации установки ИПР-нагрева (ИАП на основе тиристорного мостового выпрямителя)

Таблица 1.1.5.2

## Состав точек управления

Наименование	Шт.	Диапазон	Динамические характеристики	Погрешность	Первичный преобразователь
<b>Источник анодного питания</b>					
Включение и отключение модулей	30	Вкл/Выкл	0,7 с / 0,08 с	—	Вакуумный контактор
Подключение и отключение источника к нагрузке	30	0...20 кВ	20 кВ/мс	—	Ключ на IGBT-транзисторах
Защита диодов и транзисторов от перегрева	240	—	—	—	Тепловые предохранители
Защита по току КЗ ИП	1	0...800 А	0,7 с / 0,08 с	—	Датчик Холла
<b>ВЧ-генератор</b>					
Включение и отключение источника накала	1	0...700 А	0,7 с / 0,08 с	—	Вакуумный контактор
Подключение и отключение имитатора нагрузки	4×1	0...1 МВт	0,7 с / 0,08 с	—	Вакуумный контактор

## 1.1.5.7. Каналы измерения параметров ВЧ-системы

Все каналы измерения электрических параметров ВЧ-системы должны отвечать ряду требований:

Основные требования в этом случае, предъявляются к датчикам и первичным преобразователям:

1. Подключение преобразователя не должно влиять на амплитуду и форму измеряемого сигнала.
2. Преобразование не должно зависеть от спектра и амплитуды измеряемого сигнала.
3. Преобразование не должно зависеть от условий окружающей среды (температуры, давления, влажности).
4. Энергия, рассеиваемая в преобразователе, не должна изменять коэффициент деления.
5. В преобразователе должна отсутствовать корона и утечки по изоляции, изменяющие коэффициент деления.

В каждом канале измерения между логической и силовой частями должна быть обеспечена гальваническая развязка на уровень рабочего напряжения ВЧ-генераторов (т. е. до 20 кВ).

Для выполнения этих требований, измерительный канал должен иметь вид, представленный на рис. 1.1.5.9, где ПНЧ – преобразователь «напряжение-частота», частота на выходе которого линейно зависит от входного напряжения. Необходимо отметить, что вместо ПНЧ может быть использован любой стандартный АЦП.

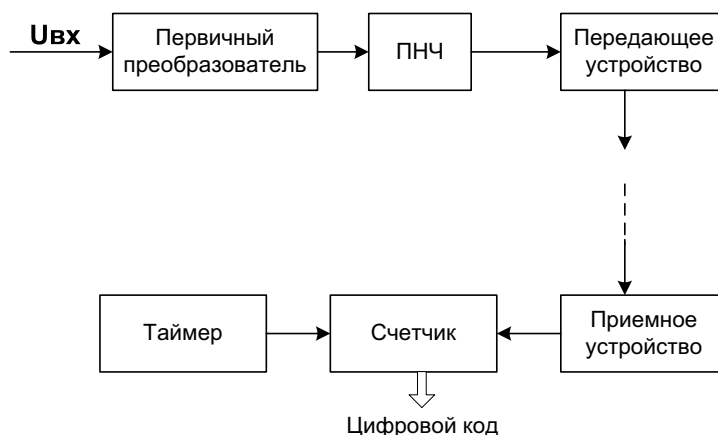


Рис. 1.1.5.9. Структура канала измерения параметров ВЧ-генератора

Развязка на высокое напряжение достигается за счёт применения в качестве канала связи между передающим и приёмными устройствами волоконно-оптической линии. Все устройства, преобразующие аналоговый сигнал в последовательность импульсов (ПНЧ) или цифровой код (АЦП), подключаются к общему проводу силовой части, поэтому их питание должно осуществляться изолированными источниками напряжения.

### Первичные преобразователи импульсных напряжений

Первичное преобразование импульсных напряжений осуществляется с помощью трансформаторов напряжения и 4-х типов делителей: омического, емкостного, смешанного, омического экранированного.

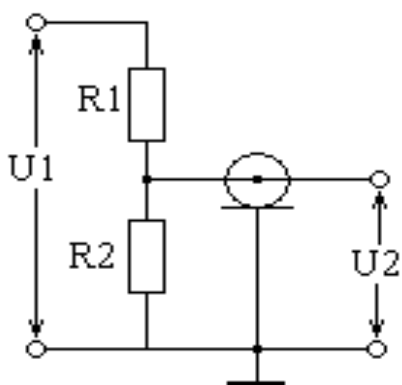


Рис. 1.1.5.10. Схема ОДН

### Омические делители напряжения (ОДН)

ОДН состоит из одного или нескольких включённых последовательно резисторов в верхнем плече  $R_1$ , имеющих малую индуктивность, и резистора нижнего плеча  $R_2$ .

Основной вид искажения – сглаживание фронта измеряемого импульса.

Причинами искажений в данном случае являются индуктивность делителя и соединительных проводов, ёмкость делителя относительно земли и ёмкость измерительного кабеля.

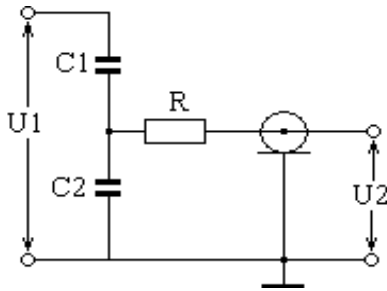


Рис. 1.1.5.11. Схема ЕДН

Основные виды искажений ЕДН – это колебания после фронта и спада импульса, медленный спад вершины импульса, а в паузе после окончания импульса – смещение нуля. В чистом виде емкостные делители применяются редко, т. к. обладают серьёзным недостатком, в частности подключение к ним через измерительный кабель нормализатора приводит к дополнительным погрешностям измерения.

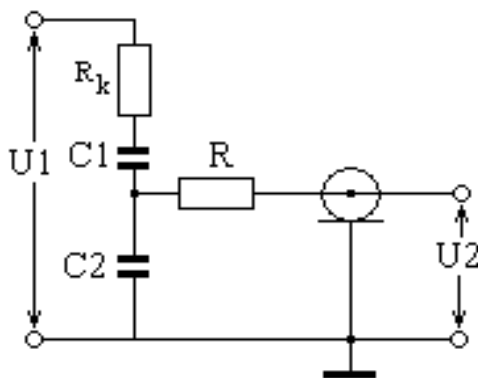


Рис. 1.1.5.12. Демпфированный ЕДН

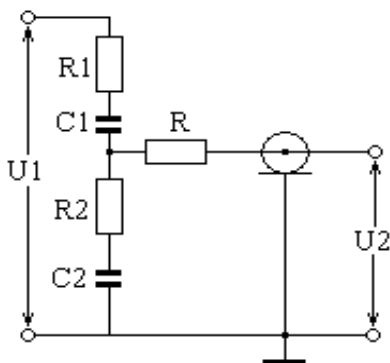


Рис. 1.1.5.13. Компенсированный делитель

### Ёмкостные делители напряжения (ЕДН)

ЕДН состоит из верхнего (одного или нескольких соединённых последовательно конденсаторов с малой индуктивностью, имеющих результирующую ёмкость  $C1$ ), а также нижнего плечей (конденсатор  $C2$ ).

### Демпферный ёмкостной делитель

Резистор  $R_k$  – специально включаемый демпферный резистор с сопротивлением несколько сотен Ом. Наилучшие результаты получаются, если его сопротивление несколько ниже критического, равного  $R_{кр} = 2\sqrt{\frac{L}{C1}}$ . В этом случае реакция на прямоугольный импульс имеет сильно затухающую форму с небольшим выбросом.

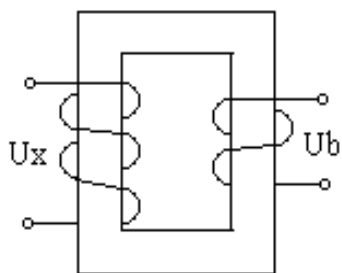
### Смешанные (компенсированные) делители

Для соответствия этих делителей требованиям к датчикам должно выполняться условие:  $R1 \cdot C1 = R2 \cdot C2$ . В таких делителях совмещаются достоинства емкостных и омических делителей.

В этом случае реакция на прямоугольный импульс минимальна и определяется либо искажениями в измерительном кабеле, либо особенностями распространения электромагнитной волны вдоль делителя.

### *Омические экранированные делители*

Такие делители применяются редко из-за применения сложной системы экранов для выравнивания распределения напряжения вдоль резистора R1, а также корректировки реакции на прямоугольный импульс дополнительными элементами.



*Рис. 1.1.5.14. Трансформатор напряжения*

### *Трансформаторы напряжения*

Измерительные трансформаторы напряжения применяют для расширения пределов измерения напряжения переменной частоты. Первичная обмотка трансформатора подключается к цепи с измеряемым напряжением, а вторичная — к измерительному устройству.

Особенностью работы трансформатора напряжения является то, что его вторичная обмотка замкнута на большое сопротивление, поэтому токи в обмотках трансформатора малы и он работает в условиях, близких к холостому ходу обычного силового трансформатора.

### *Канал измерения выходного напряжения ИАП*

Поскольку скорость изменения выходного напряжения источника анодного питания составляет порядка 15 кВ/с, в качестве первичного преобразователя предлагается использовать омический делитель напряжения. По возможности входное сопротивление делителя должно быть большим, чтобы уменьшить влияние первичного преобразователя на цепь, потенциал которой требуется измерить.

Такой делитель может быть составлен из сопротивлений:

$$R1 = 400 \text{ кОм (рис. 1.1.5.13), } R = 2,2 \text{ кОм.}$$

Тогда коэффициент деления равен:

$$k = \frac{R2}{R1 + R2} = \frac{220}{400220} = 1:1800. \quad (1.1.5.33)$$

Оценим ток, отбираемый из силовой цепи:

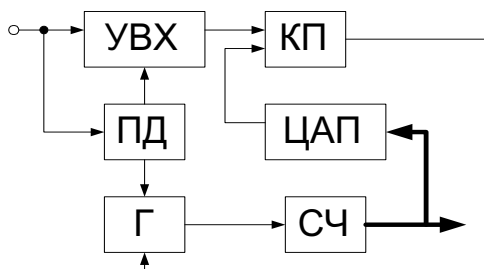
$$I_d = \frac{U_d}{R_d} = \frac{15000}{400220} = 37 \text{ мА.} \quad (1.1.5.34)$$

Для преобразования в цифровую форму, как уже было сказано, можно использовать ПНЧ или любой другой тип АЦП. На самом деле, величина интервала дискретизации не должна превышать 2 мкс, для восстановления формы импульса с погрешностью не более 30 В. В настоящее время выпускаются быстродействующие ПНЧ с максимальной частотой до 4 МГц, например VFC110 фирмы «Burr-Brown». Характеристики этого устройства имеют недостаточные значения для решения поставленной задачи. Поэтому следует использовать АЦП со следующими характеристиками: 8 разрядов, выходной код, частота преобразования 1 МГц. С выхода АЦП цифровой код поступает на оптоэлектронный преобразователь. Помимо развязки логических схем контроллера и силовых цепей, данный вид передачи цифрового сигнала позволяет уйти от проблем, связанных с наведёнными помехами. Приёмником на стороне контроллера может служить модуль PGR60310, выпускаемый фирмой «Ericsson».

### *Каналы измерения пикового напряжения на анодах генераторных ламп и на антенне*

Основными проблемами при измерении пикового значения напряжения являются: определение момента достижения максимального значения и запоминание этих значений. АЦП, ориентированные на измерение амплитудных значений для решения этих проблем включают в свой состав два дополнительных элемента: ПД – пиковый детектор и УВХ – устройство выборки и хранения.

Структурная схема АЦП, измеряющего пиковые значения напряжения и построенного по схеме последовательного взвешивания, показана на рис. 1.1.5.15.



*Рис. 1.1.5.15. Структурная схема АЦП пикового значения: УВХ – устройство выборки и хранения; ПД – пиковый детектор; Г – высокочастотный генератор импульсов; СЧ – счётчик; КП – компаратор*



Поскольку рабочая частота ВЧ-генератора 13 МГц, то АЦП должно отвечать следующим требованиям: частота дискретизации  $f_{АЦП} > 2f_G$ , т. е. максимальная частота дискретизации, которую способно обеспечить АЦП, должна равняться 30 МГц, а разрядность АЦП – 8.

Для преобразования сигнала в данном случае, предлагается использовать компенсированный делитель (рис. 1.1.5.13).

Каналы измерения токов первичным преобразователем тока отличаются от каналов измерения напряжения только первичным преобразователем, т. к. большинство средств измерения тока, изготовленных промышленно, имеют потенциальный выход. Наиболее распространёнными устройствами для измерения импульсных токов являются шунты, воздушные трансформаторы тока (пояса Роговского) и широкополосные импульсные трансформаторы тока.

Конструктивно шунты подразделяются на плоские (петлевые), цилиндрические и дисковые.

Пояс Роговского представляет собой катушку, индуктивно связанную с контуром измеряемого тока (рис. 1.1.5.16). Обычно катушка выполняется в виде тора, охватывающего провод с измеряемым током. На выходе трансформатора включается интегрирующая цепь.

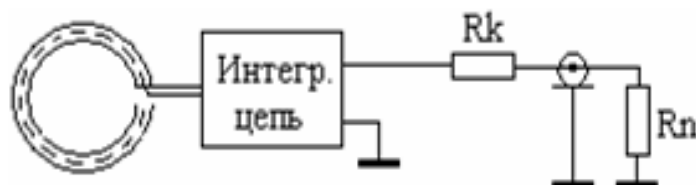


Рис. 1.1.5.16. Принципиальная электрическая схема пояса Роговского

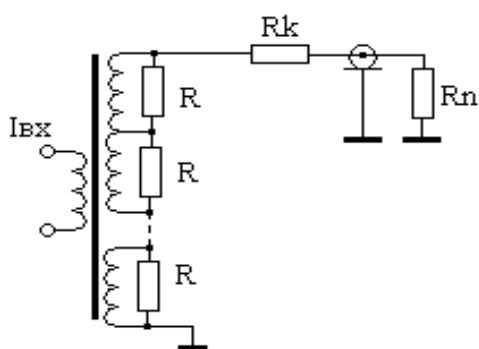


Рис. 1.1.5.17. Импульсный трансформатор тока

### Импульсный трансформатор тока

Сопротивления  $R$  подключаются для согласования с нагрузкой. Сопротивление нагрузки подключается к отдельным виткам обмотки или к секциям. Число секций выбирается таким образом, чтобы резонансная частота каждой была значительно больше максимальной частоты, которая определяется заданным временем установления трансформатора.

В качестве нормализатора можно использовать пиковые детекторы, автокомпенсационные преобразователи, амплитудно-временные преобразователи.

## Датчик Холла

Датчики данного типа построены на принципе использования эффекта Холла. Эффект Холла заключается в следующем: если к пластинке из диэлектрика, по которой протекает ток, обусловленный источником  $E$  приложить магнитное поле  $B$ , то между краями пластинки, параллельными линии протекания тока, возникнет разность потенциалов, по которой можно судить о величине магнитного поля.

Схема датчика Холла представлена на рис. 1.1.5.18–1.1.5.19.

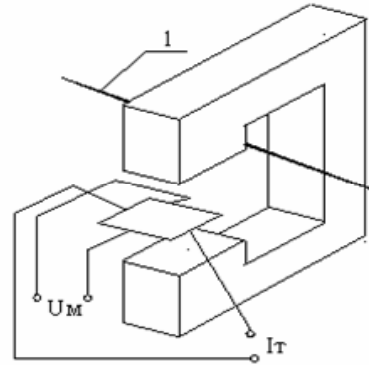
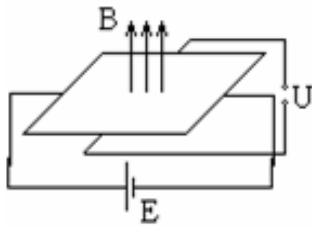


Рис. 1.1.5.18. Принцип работы датчика Холла:  $B$  – линии магнитной индукции;  $E$  – электрический элемент;  $U$  – измеряемое напряжение

Рис. 1.1.5.19. Структура датчика Холла:  $l$  – провод, в котором необходимо измерить ток;  $U_m$  – измеряемое напряжение;  $I_T$  – постоянный ток

Измеряемое напряжение будет определяться выражением:

$$U_m = \frac{R \cdot B \cdot I_T}{d}, \quad (1.1.5.15)$$

где  $R$  – постоянная Холла;  $B$  – индукция магнитного поля;  $d$  – толщина пластинки.

В результате того, что индукция магнитного поля будет определяться током, протекающим в проводе  $l$ , напряжение  $U_m$  будет зависеть от измеряемого тока. Достоинством датчиков Холла является отсутствие гальванической связи между чувствительным элементом и силовой цепью.

### Канал измерения анодного тока

В качестве первичного преобразователя анодного тока предпочтительнее использовать промышленно изготавливаемый шунт типа 150 ШС, основные технические характеристики которого приведены в табл. 1.1.5.3.

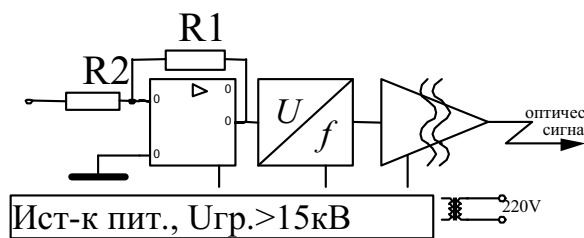
Таблица 1.1.5.3

*Технические характеристики стационарного измерительного шунта 150ШС*

Класс точности	0,5
Номинальное падение напряжения, мВ	150
Номинальный ток выпускаемых шунтов, А	150, 300, 750, 1500, 2000, 3000
температура окружающего воздуха, °С	от –40 до +50
относительная влажность при 35 °С, %	95
Габаритные размеры, мм	от 12×30×195 до 100×136×350
Масса, кг (без токовых и потенциальных зажимов)	от 0,38 до 11,40

Для измерения анодного тока одной генераторной лампы достаточно использовать первичный преобразователь, рассчитанный на диапазон 0...150 А. Из табл. 1.1.5.3. следует, что в описываемом случае требуется усиление выходного сигнала для дальнейшей оцифровки. Коэффициент усиления должен быть равен 66. Для этой процедуры можно использовать схему усиления (рис. 1.1.5.20), построенную на прецизионном операционном усилителе. Коэффициент передачи этой схемы равен:

$$U_{ВЫХ} = U_{ВХ} \frac{R1}{R2}. \quad (1.1.5.16)$$



*Рис. 1.1.5.20. Усилитель-нормирующий преобразователь*

Таким образом, при  $R1 = 6$  кОм и  $R2 = 1$  кОм максимальный выходной сигнал 9,9 В. Усилитель для надёжной работы должен быть подключен к общему проводу силовой цепи, поэтому его питание должно осуществляться от источника, развязанного на потенциал точки измерения.

Низковольтный сигнал, снимаемый с потенциального выхода шунта, необходимо усилить при помощи схемы, приведенной на рис. 1.1.5.20. Поскольку высокая частота измерений в данном случае не требуется, оцифровывать сигнал можно при помощи ПНЧ, работающие на частоте 500 кГц. В качестве ПНЧ предлагается использовать микросхему VFC100 фирмы «Burr-Brown». Период счета импульсов равен 1 мс.

### *Канал измерения частоты ВЧ-генератора*

Измерение частоты генератора можно производить аналоговыми и цифровыми методами. Из аналоговых методов можно выделить методы, использующие резонансные контуры или ферромагнитные устройства.

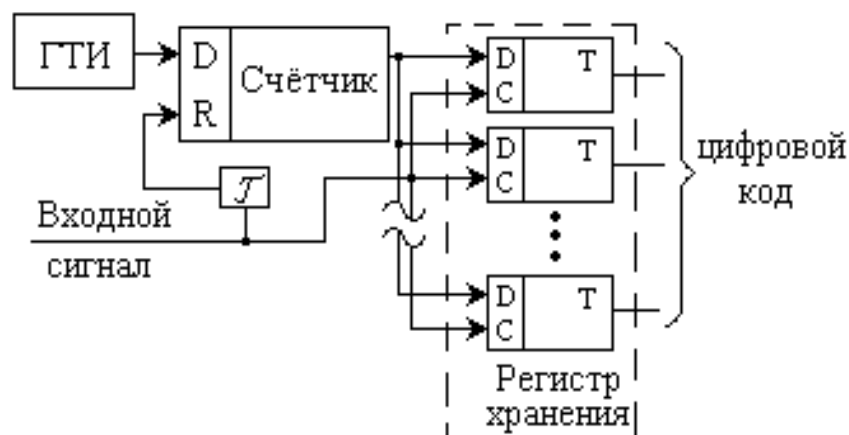


Рис. 1.1.5.21. Принципиальная электрическая схема измерителя периода счёта импульсов

### Канал измерения катодного тока

Алгоритм работы схемы предполагает включение источника питания накала предварительно перед началом ВЧ-разряда, причём ток источника остаётся неизменным в течение всего интервала работы установки В качестве первичного преобразователя можно использовать шунт ШС150 с диапазоном 0...750 А, что необходимо последующее преобразование полученной величины в цифровой код. Поэтому удобнее использовать схемы с прямым преобразованием частота-код. Варианты такой схемы показаны на рис. 1.1.5.18–1.1.5.20.

На выходе схемы (рис. 1.1.5.21) в цифровом виде будет представлен период входного сигнала, выраженный в количестве тактовых импульсов, укладываемых в периоде. Очевидно, что чем выше частота генератора тактовых импульсов, тем больше точность такого преобразователя. Но при частоте ВЧ-сигнала  $\approx 13$  МГц для обеспечения погрешности не более 1 % необходимая частота измерительного генератора должна составлять 3 ГГц. Более приемлемой на практике схемой является подсчет количества импульсов входного сигнала за определённый промежуток времени (рис. 1.1.5.21.). При этом очевидно, что чем длиннее интервал опроса, т. е. чем меньше частота генератора тактовых импульсов в схеме на рис. 1.1.5.22, тем точнее можно измерить частоту входного сигнала, усредняя её за период генератора тактовых импульсов. Тогда при частоте сигнала до 30 МГц и периоде генератора около 10 мкс можно получить погрешность не более 1 %.

Более приемлемой на практике схемой является подсчет количества импульсов входного сигнала за определённый промежуток времени (рис. 1.1.5.22).

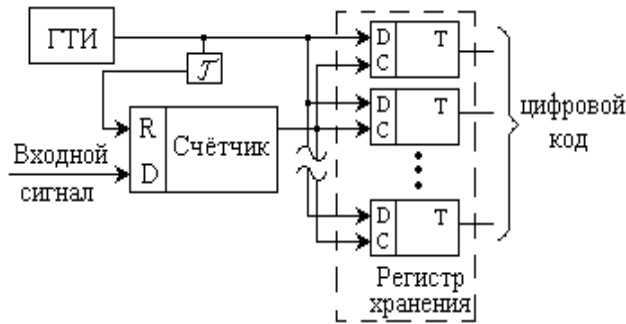


Рис. 1.1.5.22. Принципиальная электрическая схема измерителя частоты входного сигналов

При этом очевидно, что чем длиннее интервал опроса, т. е. чем меньше частота генератора тактовых импульсов в схеме рис. 1.1.5.21, тем точнее можно измерить частоту входного сигнала, усредняя её за период генератора тактовых импульсов. Тогда при частоте сигнала до 30 МГц и периоде генератора около 10 мкс можно получить погрешность не более 1 %.

Для расширения диапазона измерения можно использовать перестройку частоты генератора тактовых импульсов. Расширение требуется вследствие того, что при частоте 1 МГц на интервал генератора 10 мкс будет укладываться всего 10 колебаний измеряемой величины, т. е. точность измерения частоты будет очень низкой. С другой стороны при частоте 30 МГц на интервале генератора 1 мс будет 30000 импульсов измеряемой величины, а следовательно, потребуется очень большая разрядность счётчика. На диапазоне частот до 30 МГц для измерения частоты чаще всего используют измерительные антенны. Длина антенны должна быть кратна длине волны, а расстояние от излучающей антенны до приёмной должно равняться  $\pi \cdot n \cdot \frac{\lambda}{2}$ .

С учётом этого схема измерения частоты входного сигнала будет иметь вид, как на рис. 1.1.5.23.

В том случае, если сигнал, снимаемый с антенны, достаточен для детектирования без усиления (5...10 В), предварительный усилитель не требуется.

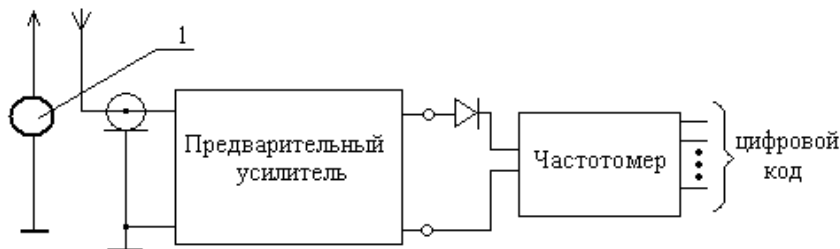


Рис. 1.1.5.23. Схема измерения частоты:  
1 – Резонансный контур ВЧ-генератора

### Канал измерения проходящей и отражённой мощности

В измерителях мощности используется преобразование ВЧ-мощности в тепловую, механическую энергию или в электрический сигнал. Поэтому измерители мощности можно разделить на:

- тепловые (калориметрические, термоэлектрические, термисторные и болометрические);
- пондеромоторные;
- электронные – выполненные на диодах, на газоразрядных приборах на основе эффекта Холла и т. д.;
- ферритовые – основаны на эффекте ферромагнитного резонанса.

Для измерения падающей мощности обычно применяется тепловой метод, но он инерционен, поэтому применять этот метод для измерения проходящей и отражённой мощности нельзя.

Первичными преобразователями для измерителей мощности служат направленные ответвители. Направленные ответвители для коаксиальных линий могут быть петлевого или щелевого типа (рис. 1.1.5.24).

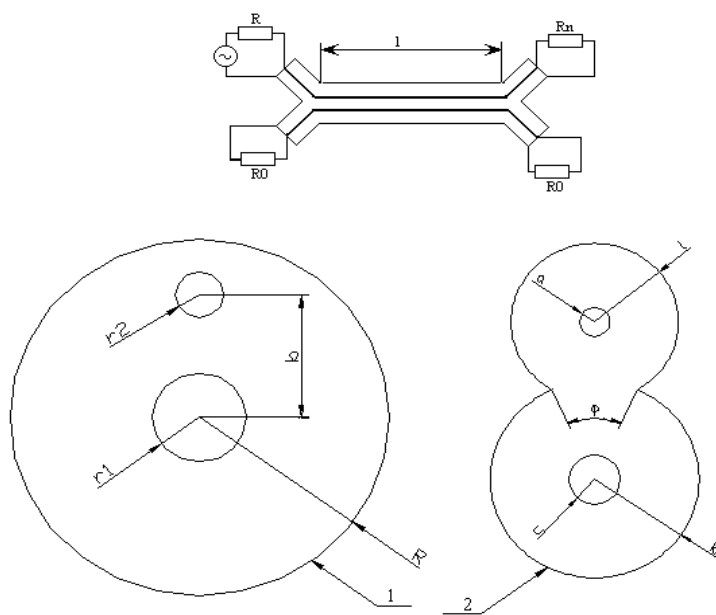


Рис. 1.1.5.24. Конструкция направленного ответвителя и поперечные сечения ответвителей петлевого и щелевого типов:

1 – поперечное сечение ответвителя петлевого типа;

2 – поперечное сечение ответвителя щелевого типа

На рис. 1.1.5.25 показано использование ответвителя для отбора малой порции энергии из волноводного тракта, исполненного в виде коаксиального кабеля и поперечных сечений ответвителей.

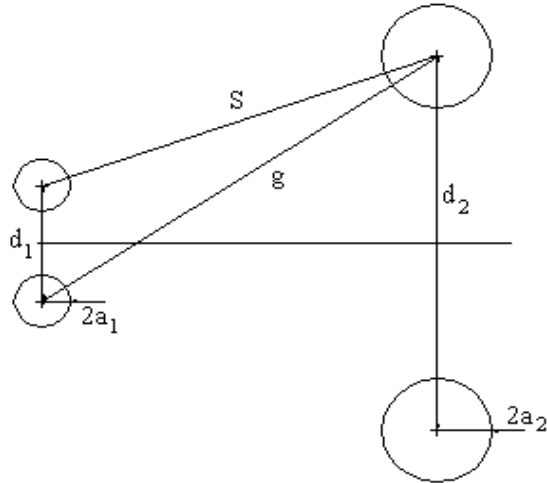


Рис. 1.1.5.25. Эквивалентная схема для расчёта направленного ответвителя:  
 1 – поперечное сечение ответвителя петлевого типа;  
 2 – поперечное сечение ответвителя щелевого типа

Для расчёта распространения электромагнитных волн используются следующие уравнения:

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial U_1}{\partial x} &= -L_{11} \frac{\partial I_1}{\partial t} - L_{12} \frac{\partial I_2}{\partial t} \\ \frac{\partial U_2}{\partial x} &= -L_{22} \frac{\partial I_2}{\partial t} - L_{12} \frac{\partial I_1}{\partial t} \\ \frac{\partial I_1}{\partial x} &= -C_{11} \frac{\partial U_1}{\partial t} - C_{12} \frac{\partial U_2}{\partial t} \\ \frac{\partial I_2}{\partial x} &= -C_{22} \frac{\partial U_2}{\partial t} - C_{12} \frac{\partial U_1}{\partial t} \end{aligned} \right\}, \quad (1.1.5.37)$$

где  $C_{11}$ ,  $C_{22}$ ,  $L_{11}$ ,  $L_{22}$  – собственные ёмкости и индуктивности одной линии в присутствии другой;  $C_{12}$  и  $L_{12}$  – взаимная ёмкость и индуктивность связанных линий.

При расчёте ёмкостей, индуктивностей и ослабляющей способности обычно рассматривают эквивалентную схему, которая представляется как две связанные линии передачи. Для ответвителя петлевого типа справедливы следующие уравнения:

$$\lg \frac{g}{S} = \frac{1}{2} \cdot \lg \frac{\left( \frac{2Rb}{R^2 + b^2} \right)^2 + \left( \frac{R^2 + b^2}{R^2 - b^2} + \frac{R^2 - b^2}{R^2 + b^2} \right)^2}{\left( \frac{2Rb}{R^2 + b^2} \right)^2 - \left( \frac{R^2 + b^2}{R^2 - b^2} + \frac{R^2 - b^2}{R^2 + b^2} \right)^2};$$

$$\begin{aligned}\lg \frac{d_1}{a_1} &= \frac{1}{2} \cdot \lg \frac{R^2 + r_1^2}{Rr_1}; \\ \lg \frac{d_2}{a_2} &= \frac{1}{2} \cdot \lg \frac{R^2 - r_1^2}{Rr_1}.\end{aligned}\quad (1.1.5.38)$$

Для ответвителя щелевого типа расчетные соотношения имеют вид:

$$\begin{aligned}\lg \frac{g}{S} &= \frac{(\sin \alpha + \sin \gamma)^2 + (\cos \alpha + \cos \gamma)^2}{(\sin \alpha - \sin \gamma)^2 + (\cos \alpha + \cos \gamma)^2}; \\ \gamma &= \frac{\Theta}{2} \cdot \frac{\pi}{2\pi - \frac{\Theta + \Phi}{2}}; \\ \alpha &= \frac{\Phi}{2} \cdot \frac{\pi}{2\pi - \frac{\Theta + \Phi}{2}}; \\ \lg \frac{d_1}{a_1} &= \lg \frac{2p \sin \alpha b^2}{c}; \\ \lg \frac{d_2}{a_2} &= \lg \frac{2p \sin \gamma}{a}; \\ p &= \frac{2\pi - \frac{\Theta + \Phi}{2}}{2\pi \sin \frac{\Theta}{2}}.\end{aligned}\quad (1.1.5.39)$$

С учётом системы уравнений 1.1.5.39 выражения для собственных и взаимных емкостей примут вид:

$$\begin{aligned}C_{11} &= 24 \cdot \frac{\lg \frac{d_2}{a_2} - \lg \frac{g}{S}}{\lg \frac{d_1}{a_1} \cdot \lg \frac{d_2}{a_2} - \lg^2 \frac{g}{S}} \cong \frac{55,5}{\operatorname{arch} \frac{d_1}{2a_1}}; \\ C_{11} &= 24 \cdot \frac{\lg \frac{d_1}{a_1} - \lg \frac{g}{S}}{\lg \frac{d_1}{a_1} \cdot \lg \frac{d_2}{a_2} - \lg^2 \frac{g}{S}} \cong \frac{55,5}{\operatorname{arch} \frac{d_2}{2a_2}}; \\ C_{12} &= 24 \cdot \frac{\lg \frac{g}{S}}{\lg \frac{d_1}{a_1} \cdot \lg \frac{d_2}{a_2} - \lg^2 \frac{g}{S}}.\end{aligned}\quad (1.1.5.40)$$



А выражения для собственных и взаимных индуктивностей можно записать как

$$\begin{aligned}
 L_{11} &= 0,2 \cdot \operatorname{arch} \frac{d_1}{2a_1}; \\
 L_{11} &= 0,2 \cdot \operatorname{arch} \frac{d_2}{2a_2}; \\
 L_{21} &= \mu_0 \ln \frac{g^2}{a_1 d_2} = 0,087 \cdot \lg \frac{g^2}{d_1 d_2}.
 \end{aligned}
 \tag{1.1.5.41}$$

С учётом вышесказанного ослабляющую способность ответвителя можно найти из выражения:

$$C = -20 \lg \frac{|K_c| + |K_L|}{2} \sin \beta_0 l,$$

где  $\beta_0$  – постоянная распространения электромагнитной волны в материале волновода;  $l$  – длина области связи;

$$\begin{aligned}
 K_c &= \frac{C_{12}}{\sqrt{C_{11} C_{22}}} = \frac{\lg \frac{g}{S}}{\sqrt{\left( \lg \frac{d_2}{a_2} - \lg \frac{g}{S} \right) \left( \lg \frac{d_1}{a_1} - \lg \frac{g}{S} \right)}}; \\
 K_L &= 0,435 \cdot \frac{\lg \frac{g^2}{d_1 d_2}}{\sqrt{\operatorname{arch} \frac{d_1}{2a_1} \cdot \operatorname{arch} \frac{d_2}{2a_2}}}.
 \end{aligned}
 \tag{1.1.5.42}$$

Расчёты, произведённые по этим формулам, показывают, что для снижения уровня мощности на выходе измерительного канала хотя бы на 4 порядка (80 дБ) – до 500 Вт – необходимо разносить коаксиальные линии на метр, или снижать диаметр внутреннего измерительного проводника до величин, порядка единиц микрометров. Очевидно, что при жёстко заданном диаметре внешнего проводника 44 мм (для кабеля РК-50-44), толщина измерительного проводника должна быть очень мала. Выходом здесь может быть либо заполнение ответвителя материалом с меньшими диэлектрической и магнитной проницаемостью (что внесёт искажение в тракт передачи ВЧ-энергии, либо использование специальных решений по ограничению отбираемой энергии.

Наиболее распространёнными на данный момент являются тепловые измерители мощности. Например, калориметрический метод обладает следующими достоинствами:

- большой диапазон измеряемой мощности (от сотых долей до десятков киловатт);
- большой частотный диапазон;
- позволяет достичь точности  $> 99 \%$ .

У калориметрического метода существуют и недостатки: громоздкость оборудования и инерционность (погрешность в  $1,5 \%$  достигается при интервале измерения не менее 3 мин). Термисторный метод этих недостатков не имеет (рис. 1.1.5.26).

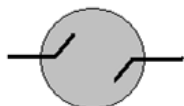


Рис. 1.1.5.26. Структурная схема термистора

Сущность этого метода заключается в использовании изменения сопротивления термочувствительного элемента под воздействием ВЧ-мощности, превращённой им в теплоту. Преобразователями мощности в теплоту служат термисторы, введённые в коаксиальный кабель.

Существует два вида коаксиальных термисторных преобразователей:

- с одним термочувствительным элементом;
- с двумя термочувствительными элементами.

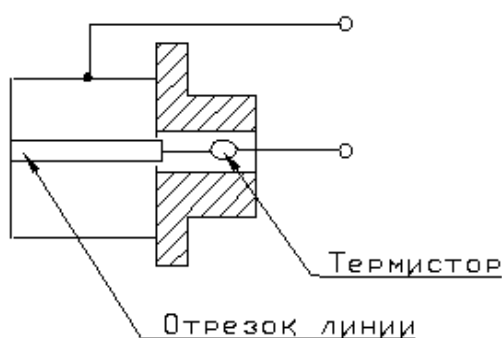


Рис. 1.1.5.27. Схема включения термистора

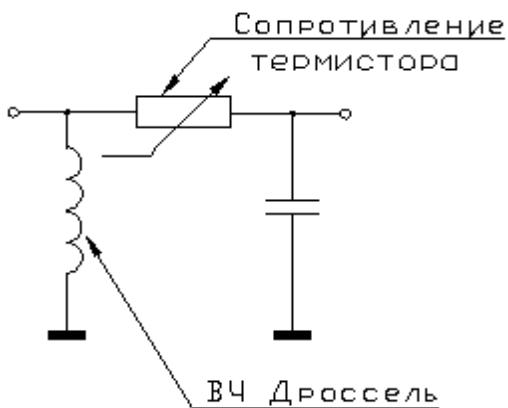
Если в преобразователе используется один термочувствительный элемент, то он монтируется таким образом, чтобы один его вывод являлся продолжением отрезка коаксиальной линии, а второй соединялся с корпусом заглушки, образующей с внутренним проводником ёмкость  $C_K$ .

Для включения термочувствительного элемента в схему моста при-

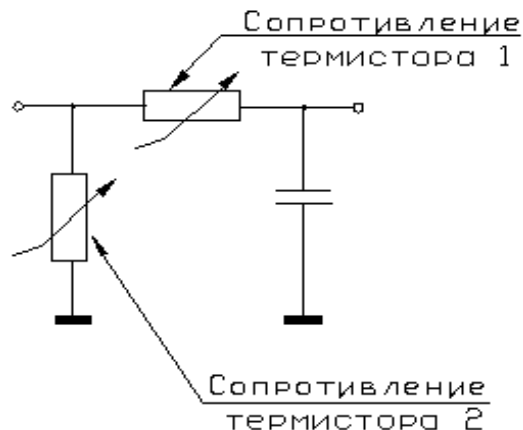
меняют ВЧ-дроссель, который припаивается к внутреннему и внешнему проводникам отрезка линии и располагается в плоскости поперечного сечения. Сопротивление термистора лежит в пределах  $R_T \approx 50 \dots 100 \text{ Ом}$ .

Недостаток термисторного преобразователя, использующего один термистор, заключается в малой полосе рабочих частот. Ограничение полосы частот происходит из-за возникновения колебательного контура (рис. 1.1.5.28.).

От этого недостатка позволяет избавиться схема, использующая два термочувствительных элемента. Необходимым условием для работы такой схемы является идентичность характеристик используемых термочувствительных элементов.



*Рис. 1.1.5.28. Эквивалентная схема замещения термисторного преобразователя с одним термочувствительным элементом*



*Рис. 1.1.5.29. Эквивалентная схема замещения термисторного преобразователя с двумя термочувствительными элементами*

На схемах термисторы включаются параллельно в линиях передачи и последовательно в мостовых схемах. Эквивалентная схема замещения такого преобразователя представлена на рис. 1.1.5.29.

Достоинства данного метода включают:

- широкий частотный диапазон;
- высокая чувствительность (нижний предел менее 1 мкВт);
- малая постоянная времени.

Необходимо также отметить, что термисторы имеют отрицательный коэффициент сопротивления, т. е. при увеличении температуры сопротивление падает. Недостатком использования термисторов является их плохая воспроизводимость, поэтому каждый термистор необходимо перед использованием калибровать.

На практике используется также другой тип термометров сопротивления — болометры. Они изготавливаются из металлов (в основном из золота или платины) и имеют гораздо более низкую постоянную времени, которая при специальном изготовлении может составлять единицы микросекунд.

### 1.1.5.8. Калибровка ВЧ-системы

Целью калибровки является, главным образом, градуировка каналов измерения проходящей и отражённой мощности. Калибровка ВЧ-системы производится при помощи эквивалента нагрузки, где ВЧ-энергия, отдаваемая в нагрузку генератором преобразуется в тепловую. Поглощённая энергия измеряется обычно калориметрическим

методом, вследствие достаточно высокой точности. Существует два типа измерительных преобразователей, используемых в этом методе: проточные и статические.

Структурная схема проточного преобразователя представлена на рис. 1.1.5.30.



Рис. 1.1.5.30. Структурная схема проточного калориметрического преобразователя

Наиболее часто используются проточные измерительные преобразователи из-за малой постоянной времени. Для проточных преобразователей можно описать мощность преобразованного сигнала:

$$P_{свч} = C_m \cdot q \cdot d\nu \cdot \Theta,$$

где  $C_m$  — удельная теплоёмкость жидкости, поглощающей энергию;  $q$  — расход жидкости;  $d\nu$  — плотность жидкости;  $\Theta$  — разность температур на входе и выходе эквивалента нагрузки.

Основным элементом калориметра является теплопоглощающая нагрузка, конструкция которой показана на рис. 1.1.5.31.

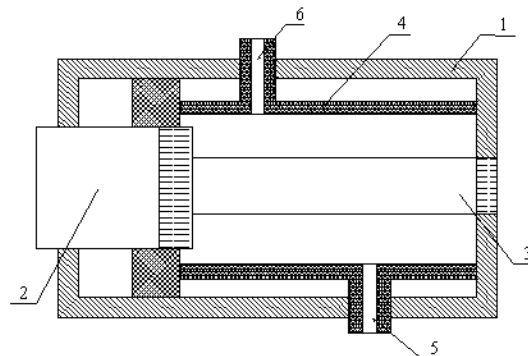


Рис. 1.1.5.31. Калориметрическая нагрузка для коаксиальных кабелей:  
 1 — корпус; 2 — внутренний проводник коаксиального кабеля;  
 3 — СВЧ резистор; 4 — направляющая трубка; 5 — трубка для подачи охлаждающей жидкости; 6 — трубка для отбора нагретой жидкости

## **2. АЛГОРИТМИЧЕСКОЕ И ИНФОРМАЦИОННОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ САЭ**

### **2.1. Оценка требуемой производительности вычислительных устройств реализующих алгоритмы управления плазмой**

Для определения требований к вычислительной мощности и пропускной способности технических средств, реализующих алгоритмы управления параметрами плазмы, рассмотрим структуру и состав задач, выполняемых СУП (рис. 2.1).

На рис. 2.1 изображены основные вычислительные средства СУП, а также структура взаимодействия между ними.

Стрелки индицируют направление передачи управления между задачами. Широкие стрелки являются программными шинами данных. Они показывают направления потоков данных внутри программного комплекса. Основной программный цикл организован по событийному механизму. Это сделано с целью достижения желаемого времени переключения задач и гарантировать время отклика системы. Данный событийный механизм позволяет управлять взаимодействием и синхронизацией между отдельными модулями.

До начала разряда производится загрузка временной циклограммы (сценария) разряда, согласно которой проводится эксперимент. На основе данной циклограммы производится настройка менеджера событий, осуществляющего контроль над сигналами асинхронных событий от системы противоаварийной защиты, формирование команд событийного управления («старт» разряд, «стоп» разряд и т. д.) и сигналов защиты по изменениям расчетных параметров управляющих воздействий. Также производится загрузка сценариев изменения положения и формы плазмы.

Начало разряда инициируется менеджером событий путем выдачи сигнала «старт» разряда (сигнал *Л*). Данный сигнал, поступая в ЭВМ сбора данных, где ранее была инициализирована программа сбора дан-

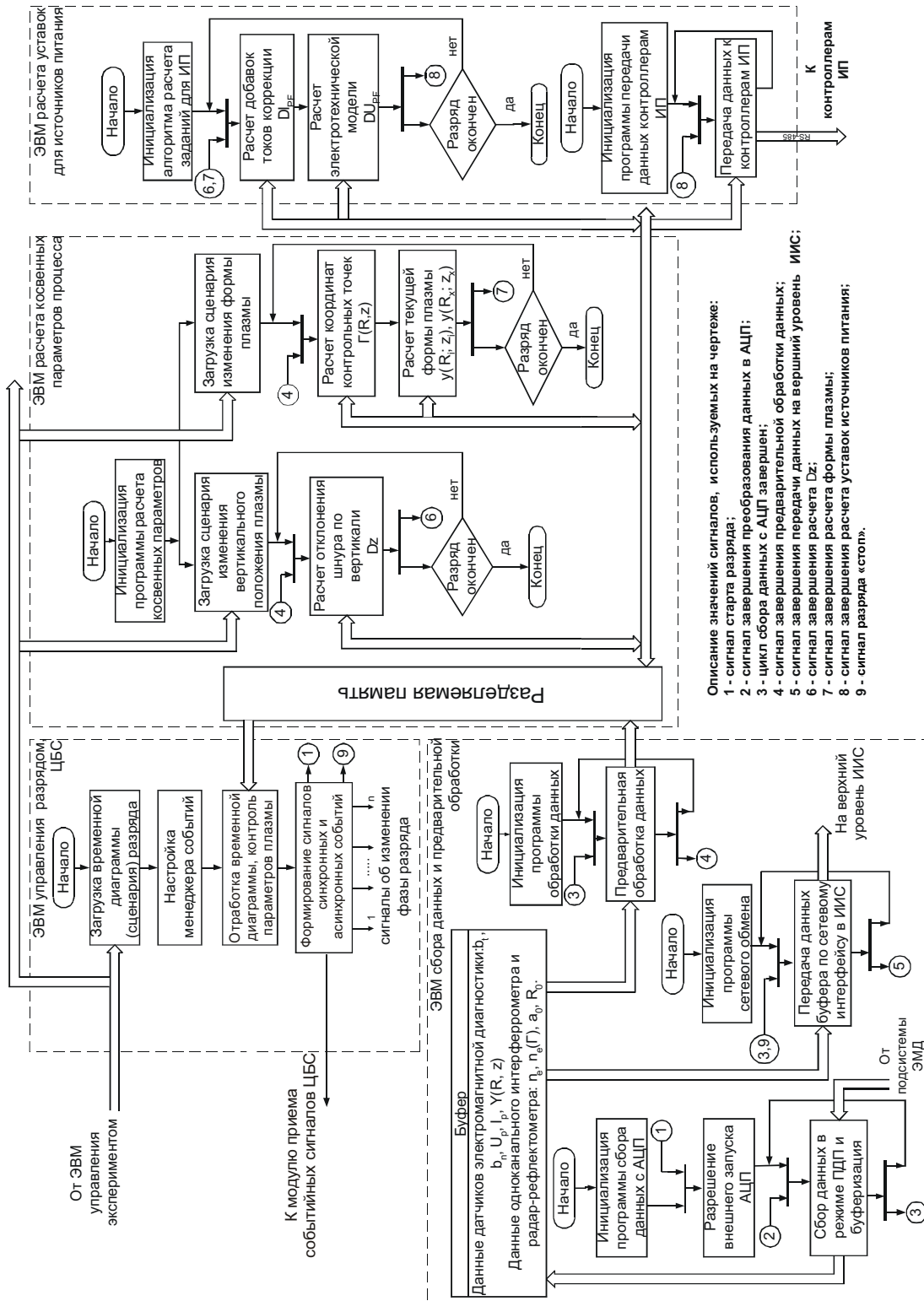


Рис. 2.1. Алгоритм функционирования СУП

ных с АЦП, даёт разрешение внешнего запуска АЦП на начало преобразования. По завершении преобразования данных в АЦП, которое сигнализируется соответствующим сигналом (сигнал 2), начинается цикл сбора данных. В процессе сбора производится буферизация всех принятых данных.

По окончании сбора данных вырабатывается соответствующий сигнал (сигнал 3), по которому инициируется выполнение предварительной обработки и передача данных, требуемых для выполнения расчетов управляющих воздействий в разделяемую память ЭВМ расчета косвенных параметров. Завершение данного этапа отмечается сигналом 4.

Данный сигнал поступает в ЭВМ расчета косвенных параметров процесса. По данному сигналу начинается параллельное выполнение расчета параметров отклонения плазменного шнура по вертикали и расчет текущей формы плазмы. Сигналы 6 и 7 вырабатываются по завершении данных расчетов.

Далее сигналы 6, 7 поступают в ЭВМ расчета уставок источников питания. При этом расчет, включающий в себя расчет добавок токов коррекции обмоток полоидального поля и расчет электротехнической модели, начинается только при условии получения обоих сигналов. В конце расчета вырабатывается сигнал 8, по которому инициируется передача расчетных данных к контроллерам источников питания.

Все данные, требуемые для расчетов, а также все выходные данные размещаются в области разделяемой памяти ЭВМ, выполняющей расчёт косвенных параметров.

Для расчёта требуемой вычислительной мощности технических средств СУП, необходимо определить соответствие требуемого времени, отводимого на проведение расчетов, с реальным временем работы вычислительного комплекса. Такую оценку можно провести при наличии значений временных интервалов, характеризующих время, отводимое на выполнение каждого программного модуля комплекса, и время, отводимое на межпроцессное взаимодействие. Время выполнения программного модуля зависит от количества операций, выполняемых в процессе работы контроллера. Время выполнения программного модуля можно определить как

$$T_i = \frac{S_i}{P}, \quad (2.1)$$

где  $S_i$  – количество операций, выполняемых на интервале цикла управления для  $i$ -задачи, операции;  $P$  – производительность процессора, операций /с.

Время, отводимое на межпроцессное взаимодействие, можно определить, исходя из пропускной способности средства межпроцессного взаимодействия и объема передаваемой информации:

$$\tau = \frac{V_d}{C}, \quad (2.2)$$

где  $V_d$  – объем передаваемой информации, Мбайт;  $C$  – пропускная способность средства межпроцессного взаимодействия, Мбайт/с.

Согласно разработанному алгоритму функционирования СУП, можно составить формулу расчёта времени задержки, необходимой для выполнения в реальном масштабе времени функций СУП. Данная формула может быть записана как

$$\begin{aligned} T_{Ц} = & \tau_{\text{ввода}} + \sum_{i=1}^l \frac{S_i}{P_Y} \Big|_{Y=1} + \max_{z=1,2} \left( \sum_{i=1}^m \frac{S_i}{P_{YZ}} + \sum_{j=1}^k \tau_{d_{YZ}}^j \right) \Big|_{Y=2} + \\ & + \sum_{i=1}^g \frac{S_i}{P_Y} \Big|_{Y=3} + \sum_{j=1}^h \tau_s^j + \sum_{i=1}^w \tau_{d_Y}^j \Big|_{Y=1} + \sum_{i=1}^u \tau_{d_Y}^j \Big|_{Y=3} + \tau_{\text{вывода}}, \end{aligned} \quad (2.3)$$

где  $S_i$  – количество операций, выполняемых на интервале цикла управления для  $i$ -задачи;  $P_Y$  – производительность процессора, операций/с;  $Y$  – номер ЭВМ;  $Z$  – номер процессора ЭВМ;  $\tau_{\text{ввода}}$  – задержка приема данных от подсистемы ЭМД, с;  $\tau_{d_{YZ}}^j$  – задержка передачи данных между процессами, с;  $\tau_s^j$  – задержка передачи управления по средством сигналов, с;  $\tau_{\text{вывода}}$  – задержка передачи расчетных данных к контроллерам управления, с.

На данном этапе проектирования, когда алгоритмы определения параметров не реализованы программно, невозможно рассчитать время выполнения программных модулей. Однако известно, что описанные ранее алгоритмы могут быть сведены к решению систем линейных уравнений  $n$ -порядка либо к решению оптимизационной задачи. Оценим время выполнения данных алгоритмов.

В случае использования для решения системы линейных алгебраических уравнений (СЛАУ) методом Гаусса, количество операций сложения/умножения составляет порядка  $n^3/3$  [44]. В случае использования метода фиксированных токовых нитей, размерность СЛАУ будет равна количеству токовых нитей. Для точного определения минимального количества токовых нитей необходимо провести дополнительные исследования при различных вариантах электромагнитной конфигурации. На данный момент очевидно, что их количество не будет превы-



шать количество исходных диагностических данных, а именно: 84. Таким образом, требуемая производительность вычислительных средств в данном случае составляет порядка 600 MFLOPS.

Для более сложных алгоритмов расчета формы плазменного шнура, операция решения СЛАУ может осуществляться несколько раз в виде оптимизационного процесса. Следует отметить, что в случае, если координаты токовых элементов меняться в процессе расчета, наиболее ресурсоемким будет процесс формирования матрицы системы. Оценим количество операций для формирования одного элемента матрицы, в случае использования оптимизационного алгоритма на основе квадратичной меры отклонений от диагностических данных. Каждый элемент матрицы системы в этом случае будет представлен следующим выражением:

$$\sum_i^n D(i, j)D(i, k), \quad (2.4)$$

где  $D$  – вектор диагностических данных.

Вектор диагностических данных может быть рассчитан из уравнения:

$$D(i, j) = \sum_i^{32} B_r(i, j)B_r(i, k) + \sum_i^{32} B_z(i, j)B_z(i, k) + \sum_i^{20} \Psi(i, j)\Psi(i, k). \quad (2.5)$$

Расчет значений  $B_{r,z}$ ,  $\Psi$  содержит двадцать одну операцию сложения/умножения и расчет двух полных эллиптических интегралов второго рода. Для расчета значения данного интеграла с точностью  $10^{15}$  при использовании преобразования Ландена необходимо 20 операций сложения/умножения. Итоговое количество операции, которое необходимо выполнить, равняется 61. Для расчета каждого элемента матрицы необходимо выполнить 10248 операций с плавающей точкой. Следует отметить, что для случая подвижных токовых элементов, их количество обычно составляет 3...5, и с учетом того, что матрица диагонально симметрична, для ее формирования требуется (при  $n = 5$ ) рассчитать 15 элементов. Таким образом, количество выполняемых операций увеличивается до 153720. Итого для одной итерации решения СЛАУ с учетом формирования матрицы необходимо выполнить 153762 операций ( $153720 + 5^3/3 = 153762$ ). С учетом цикла управления формой плазмы, требуется производительность порядка 0,4 GFLOPS. Следует отметить, что данная оценка является грубой, точное значение производительности вычислительных средств необходимо при реализации программных кодов.

Также на данном этапе можно определить задержки, обусловленные передачей данных. Самым «узким» местом в разработанной струк-

туре является разделяемая память. Для определения пропускной способности разделяемой памяти был проведен ряд экспериментов.

В эксперименте измерялось среднее время передачи пакета сообщений, с заранее установленным размером одного сообщения, от производителя (процесс 2, поток 2) потребителю (процесс 1, поток 1). На основе полученных данных была рассчитана пропускная способность среды их передачи с использованием уравнения:

$$C = \frac{\sum_i V_i}{\sum_i T_{cpi}}, \quad (2.6)$$

где  $V_i$  – размер передаваемого сообщения, байт;  $T_{cpi}$  – среднее время, отводимое на передачу одного сообщения, с.

В результате, путем изменения размера передаваемого сообщения, были получены графики зависимостей пропускной способности разделяемой памяти от размера передаваемого сообщения для многопоточной и многопроцессной схемы проведения эксперимента. Графики зависимостей представлены на рис. 2.2.

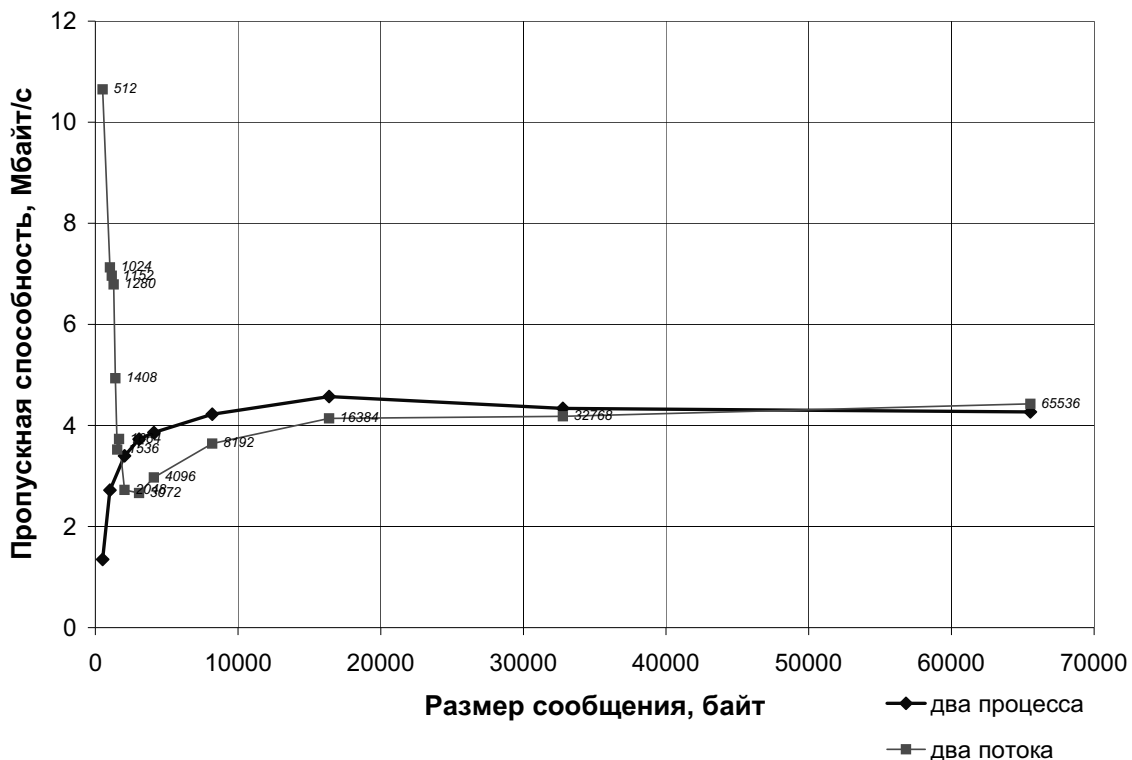


Рис. 2.2. Графики зависимости пропускной способности разделяемой памяти от размера передаваемых сообщений в СУП

Анализ графиков показывает, что при малых размерах передаваемого сообщения величина пропускной способности разделяемой памяти для поточной схемы превышает почти в 3 раза соответствующие значения для многопроцессной схемы. Этот эффект, на наш взгляд, напрямую связан с особенностями планирования потоков и процессов. При малых размерах передаваемых сообщений взаимодействие между передатчиком и приёмником идет весьма интенсивно, поскольку время, требуемое на передачу одного сообщения, мало. В этом случае для процессов данное время становится сравнимым со временем переключения процессов, и общая величина пропускной способности падает с уменьшением размера сообщения. У потоков время, отводимое на переключение между собой, составляет величину большего порядка малости, чем та же величина для процессов. Это и позволяет при их использовании передавать за один и тот же интервал времени больший объем информации. Спад пропускной способности при увеличении размера сообщения связан с особенностями операционной системы (ОС). Эксперимент проводился в ОС Linux. Поскольку данная ОС является операционной системой общего пользования, то используемые в ней алгоритмы планирования задач не используют при реализации жесткого реального времени выполнения процессов с пользовательским уровнем приоритета. И время, выделяемое на выполнение пользовательских задач, распределяется между потоками весьма неравномерно, что приводит к появлению дополнительных задержек при передаче больших сообщений.

## **2.2. Расчет информационных потоков, пропускной способности интерфейсов и каналов передачи информации**

Для определения информационных потоков и требований к пропускной способности интерфейсов, необходимо рассчитать объем информации, передаваемой в СУП от других систем КТМ, таких как ИИС, ПАЗ, а также между различными уровнями СУП. Параметры, передаваемые в СУП из ИИС перечислены в табл. 2.1. В табл. 2.2 приведены ориентировочные значения скорости передачи данных и информационные потоки в режимах разряда и межразрядной паузы.

Таблица 2.1

*Параметры плазмы, передаваемые ИИС в СУП*

<b>Контролируемый параметр</b>	<b>Средства измерения</b>
Ток плазмы $I_p$ , производная тока плазмы $dI_p/dt$	Пояса Роговского (3 шт.)
Положение плазмы	Датчики ЭМД (от 2 до 32 шт.)*
Форма плазмы	32 двухкомпонентных зонда 20 измерительных петель*
Напряжение на обходе плазменного шнура $U_p$ и производная магнитного потока $\Psi$	Измерительные петли (20 шт.)
Тороидальное поле $B_t$ и диамагнитный поток $\delta\Phi$	Тороидальные измерительные витки (4 шт.)
Распределение плотности электронов $n_e(r)$	Многоканальный радар рефлектометр (10 каналов)
Средняя плотность электронов $n_e(r)$	Одноканальный интерферометр (1 канал)
Токи и напряжения в обмотках ЭМС	Датчики Холла, делители напряжений (11 шт.)

*Примечание:* \* – в зависимости от метода расчета и схемы измерений.

Таблица 2.2

*Информационные потоки СУП*

	Скорость передачи	Информационный поток
<b>Режим разряда (5 с)</b>		
I ур. ИИС→I ур. СУП	106 Байт/ $T_u$ , $T_u = 4$ мкс	106 Байт/ $T_u$ , $T_u = 100$ мкс
II ур. СУП→I ур. СУП	2 Мбит/с	116 КБайт/с
I ур. СУП→II ур. СУП	2 Мбит/с	216 КБайт/с
I ур. СУП→II ур. ПАЗ	2 Мбит/с	Резерв трафика – 0,6 МБайт/с
<b>Режим межразрядной паузы</b>		
I ур. ИИС→III ур. ИИС	100 Мбит/с	130 КБайт/с
II ур. СУП→III ур. ИИС	100 Мбит/с	90 КБайт/с
II ур. СУП→III ур. СУП	100 Мбит/с	20 КБайт/с

### 2.3. Алгоритм работы САЭ КТМ

Процесс функционирования термоядерной установки ТОКАМАКа КТМ характеризуется сложной последовательностью технологических операций. Большое количество подсистем и сложные режимы их работы в течение эксперимента определяют необходимость использования единого подхода к управлению, который невозможен без четкого понимания алгоритма функционирования системы автоматизации экспериментов (САЭ) КТМ. Проведенный анализ регламентов и режимов работы подсистем ТОКАМАКа позволил сформулировать общий алгоритм работы САЭ КТМ. Процесс функционирования ТОКАМАКа КТМ, выполняется под управлением САЭ и алгоритма работы КТМ, представленного на рис. 2.3, и показывает основные технологические операции, выполняемые в течение экспериментальной кампании. Алгоритм имеет последовательно-циклическую структуру, в которой выделяются три режима работы: предпусковой, пусковой и послепусковой.



Рис. 2.3. Функциональная схема САЭ КТМ

В предпусковом режиме решаются задачи подготовки и тестирования готовности систем ТОКАМАКа КТМ к пусковому режиму работы. На этом этапе выполняется чистка и боронизация вакуумной камеры, создание высокого вакуума, прогрев стенок камеры и напуск рабочего газа в камеру. После настройки технологического и диагностического оборудования выполняется тестовый пуск, определяющий готовность системы к переходу в пусковой режим работы. На этом же этапе задается и вводится сценарий разряда.

К пусковому режиму относятся все операции, выполненные в течение интервала создания, существования и гашения плазмы. Этот интервал составляет около 5 с.

В послепусковом режиме полученные в пусковом режиме данные передаются на верхний уровень САЭ КТМ, где выполняется их обработка, хранение и визуализация с целью анализа условий протекания разряда и изменения сценария последующего разряда.

В течение одного эксперимента пусковой и послепусковой режимы последовательно чередуются. Окончание эксперимента осуществляется либо после выполнения всех запланированных исследований, либо при нарушении нормального режима функционирования САЭ КТМ, вследствие возникновения аварийной ситуации. При этом, в зависимости от типа аварийной ситуации, возможен переход в предпусковой режим или завершение работы установки.

### **3. ОБЩИЕ ВОПРОСЫ ТЕХНИЧЕСКОГО ПРОЕКТА САУ**

#### **3.1. Структура комплекса технических средств систем управления пусковым режимом**

Наиболее важными с точки зрения функционирования установки являются средства, задействованные в течение пускового режима работы. Самые жесткие требования к узлам системы предъявляются именно в режиме пуска, в котором выполняются основные функции стендового комплекса. Режим характеризуется высокими амплитудами токов, механическими нагрузками, повышенными электромагнитными наводками и большими информационными потоками.

Проведенные работы по анализу алгоритмов функционирования ТОКАМАКа КТМ и определению принципов построения САЭ КТМ, выполненные на этапах эскизного проектирования [41] и при создании ТЗ на разработку системы автоматизации экспериментов ТОКАМАКа КТМ [2], позволили определить структуру комплекса технических средств (КТС). Структура КТС системы управления пусковым режимом показана на рис. 3.1.

В состав комплекса технических средств системы управления ТОКАМАКом КТМ (рис. 3.2) в пусковом режиме входят элементы четырех систем: системы управления плазмой, информационно-измерительной системы, системы синхронизации и системы противоаварийной защиты (СПЗ). Настоящий раздел технического проекта посвящен выработке технических решений по системе управления плазмой.

В пусковом режиме в работе системы управления плазмой выделяется три фазы:

1. Создание плазмы с заданной температурой и плотностью.
2. Удержание плазмы в течение 5 с.
3. Плавный вывод энергии из катушек управления и гашение плазмы.

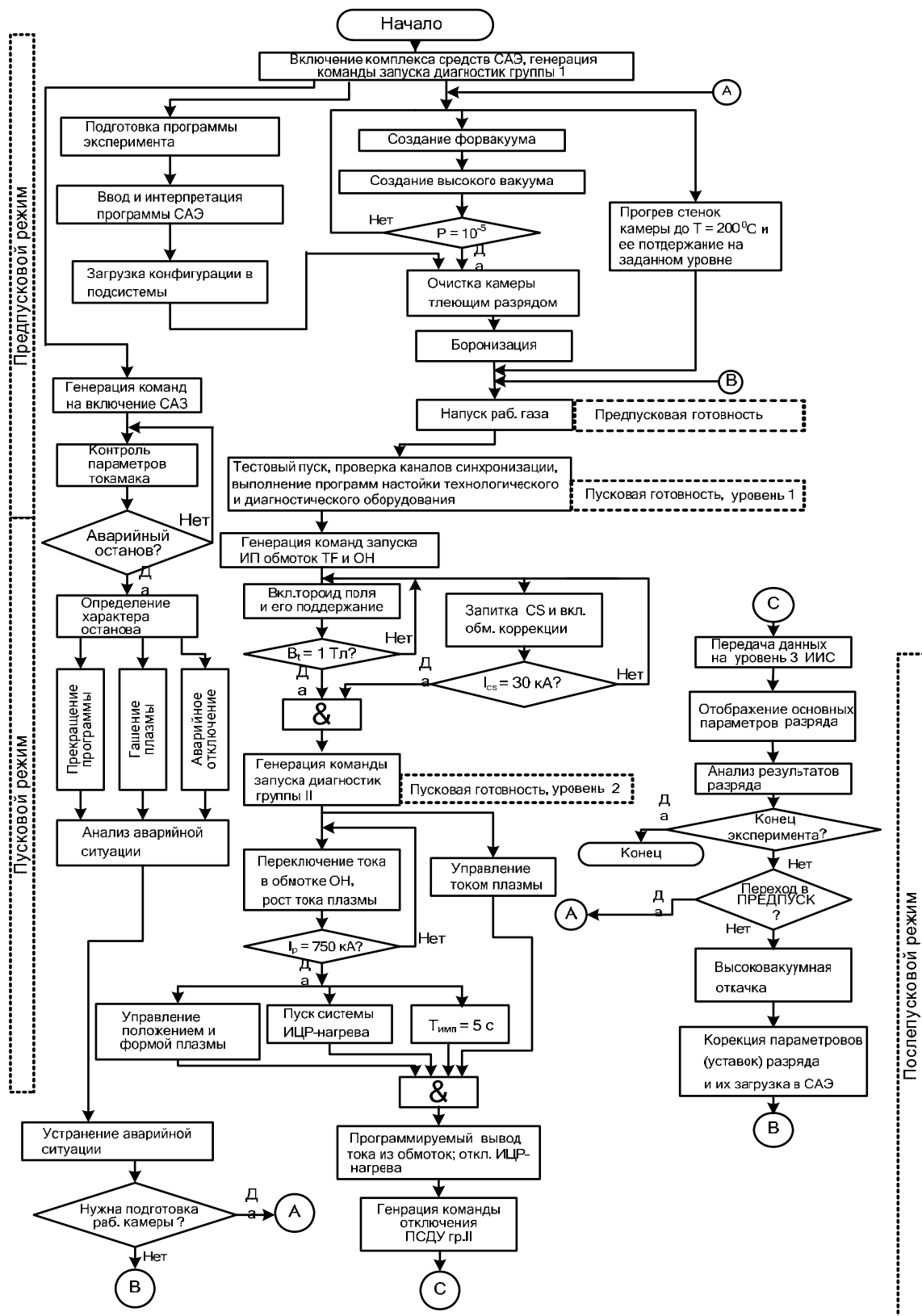


Рис. 3.1. Блок схема алгоритма работы САЭ КТМ





На фазе создания плазмы решаются задачи логико-программного управления током в обмотках тороидального поля ТФ и обмотках управления PF1–PF6, HFC, а также в обмотке CS, обеспечивающей пробой рабочего газа и выполнение омического нагрева плазмы. В течение этой фазы для инициирования плазменного разряда и преодоления потенциальных барьеров в процессе роста тока выполняется дополнительный нагрев плазмы на частотах электронно-циклотронного резонанса (ЭЦР).

В течение фазы удержания плазмы СУП решает задачи управления формой и положением плазмы, газонапуском и высокочастотным нагревом плазмы (ИЦР-нагрев). Для автоматического решения перечисленных задач можно использовать минимум необходимой измерительной информации о параметрах плазмы, измеряемых датчиками электромагнитной диагностики, радар-рефлектометром и одноканальным интерферометром.

При выполнении неоперативного управления и анализе результатов плазменных разрядов важно иметь информацию о распределении температуры электронов и интенсивности полных радиационных потерь по сечению плазмы, получение которой обеспечивают диагностика мягкого рентгеновского излучения (ДМРИ) и диагностика полных радиационных потерь (ДПРП). Эта информация также исключительно важна во время первых пусков ТОКАМАКа, так как из-за ошибок задания сценария разряда плазма может не достигать требуемой температуры и, соприкасаясь со стенками, гаснуть на этапе создания. Наличие информации с перечисленных диагностик в этом случае позволяет найти нужный сценарий разряда и избежать лишних срывов плазмы.

В течение пускового режима необходимо выполнять синхронизацию работы входящих в состав СУП, СПЗ, ИИС технических средств. Эти функции выполняются распределённой двухуровневой системой синхронизации. Согласно рис. 3.2. технические средства верхнего уровня синхронизации размещены в крейтах СУП и СПЗ. К этим модулям относятся: высоко стабильный генератор тактовой частоты, входящий в состав модуля формирователя синхросигналов, модуль приёма кодов асинхронных событий, модуль формирования сигналов асинхронных событий. Синхронизация работы подсистемы управления технологическими системами и подсистем сбора данных и диагностических систем выполняется соответствующими локальными модулями синхронизации, входящими в состав этих подсистем и образующими

первый уровень системы синхронизации. Передача опорной тактовой частоты и кодов команд на первый уровень системы синхронизации осуществляется через оптический разветвитель. Приём сигналов асинхронных событий на верхнем уровне осуществляется, соответственно, модулем приёма асинхронных событий. Временная последовательность синхронных событий в системе задаются и генерируются программно.

Задачей системы СПЗ является предотвращение срывов плазмы, возникающих вследствие развития неустойчивостей в плазме, а также отработка аварийных ситуаций, возникающих при нарушении заданного режима функционирования технических средств и подсистем ТОКАМАКа КТМ. Устройства верхнего уровня системы СПЗ размещены в блоке противоаварийной защиты. Датчики и исполнительные механизмы первого уровня системы СПЗ конструктивно размещены вместе с оборудованием других систем первого уровня, расположенных вблизи технологических систем.

Устройства уровня III системы размещаются в помещении пультовой ТОКАМАКа КТМ, и функционально подразделяются на две части. Первая часть используется для отображения информации и управления ТОКАМАКом в процессе экспериментов и включает в свой состав пульт общего управления экспериментом, пульт оператора-технолога и панели коллективного пользования. Вторая часть выполняет функции послеэкспериментальной обработки и анализа данных, в частности, сбор всех экспериментальных данных, их сохранение в архиве и обработку. Эти функции выполняет сервер сбора, регистрации и архивирования результатов испытаний. В свою очередь визуализацию данных на пульте физика и обеспечение доступа к экспериментальной информации со стороны рабочих станций исследователей выполняет ЭВМ обработки данных и визуализации.

Выбор технических средств систем управления пусковым режимом определяется требованиями к решению перечисленных выше задач, особенностями работы технологического оборудования и диагностических систем, и алгоритмом функционирования САЭ КТМ в целом.

Состав технических средств 1-го уровня системы управления определяется характеристиками источников питания обмоток управления, и параметрами системы ВЧ-нагрева, и описывается в соответствующих разделах.

Таблица 3.1

## Заказная спецификация на КТС системы управления пусковым режимом

Наименование устройства	Тип устройства	Шт.	Стоимость, USD	Примечание
VME-крейт	Subrack 7U, 160 мм boards, 21 Slot Monolithic Backplane, 230 В / 450 Вт power supply, VME Housing, accessories	1	2600	Schroff
ЭВМ управления разрядом	EmPower EP1A PowerPC MPC 8240 400MHz, 64Mb SDRAM, 2PMC sites; PMC941 – мезонин, 4 независимых 10/100BaseT интерфейса; Конвертер Ethernet Base100T / Ethernet 100BaseF	1	2400	RtSoft
ЭВМ вычисления заданий для ИП	PowerPC MPC 8240 400 МГц, 64 Мбайт SDRAM, 2PMC sites; PMC941 – мезонин, 4 независимых 10/100BaseT интерфейса; Конвертер Ethernet Base100T / Ethernet 100BaseF	1	3800	RtSoft
ЭВМ реконструкции формы плазмы	400 МГц PowerPC 775, 128 Мбайт DRAM PMC941 – мезонин, 4 независимых 10/100BaseT интерфейса, конвертер Ethernet Base100T / Ethernet 100BaseF	1	1400	
Модуль управления газонапуском	D/A converter, 100kHz sampling; prog sample rate generator; 4 Мбайта Buffer SRAM; 68030 CPU; DMA ctrlr w/BLT	1	800	
Панель коллективного пользования	Плазменная панель	2	20000	
Пульт общего управления экспериментом	P4, 1.2ГГц, 512 Мбайт, 100 Мбит/с	1	1500	
Сетевой коммутатор	3Com SuperStack3, Switch, 10/100/1000, 12 портов	1	510	
Локальный модуль синхронизации		1	1200	Проект
Итого			34210	

Таблица 3.2

*Технические средства третьего уровня САЭ*

<b>Наименование устройства</b>	<b>Тип устройства</b>	<b>Шт.</b>	<b>Стоимость, USD</b>	<b>Примечание</b>
Сервер архивирования и обработки данных	R-style EP272r: 1U, 2×CPU Itanium 2, 2×1000 BaseT, RAID-массив RMS01: 4U, 1 Тбайт, Dual Ultra 160 SCSI	1	6000	
Сервер обработки и визуализации данных	R-Style EP272r: 1U, 2×CPU Itanium 2, 2×1000 BaseT	1	2100	
Графическая станция	PIII/800 МГц, 128 Мбайт ОЗУ, GeForce 400MX, Монитор Samsung 775FT	4	1000	
Сетевой коммутатор	3Com SuperStack 3, Switch, 12×10/100/1000 BaseT	1	510	
Пульт оператора-технолога	P4, 1,2 ГГц, 512 Мбайт, 100 Мбит/с, Монитор Samsung 775FT	1	1500	
Оптический разветвитель	Star & Tree Coupler, 1:16	2	245	
<b>Итого</b>			<b>12355</b>	

### 3.2. Размещение технических средств системы управления пусковым режимом

Спецификация технических средств системы управления пусковым режимом та ТОКАМАКе КТМ представлена в табл. 3.3.

Таблица 3.3

*Технические средства системы управления пусковым режимом*

№ п/п	Наименование оборудования	Кол-во, шт.	Размещение (позиционное обозначение)	Габариты, Н×W×D, мм
1	Стойка серверов	1	Напольное (S4)	2200×800×600
2	Пульт, в составе: плазменная панель (2 шт.), дисплей (3 шт.), системный блок (2 шт.), функциональная клавиатура (3 шт.)	1	Настенное (S5) Настольное (S1)	700×4800×1000
4	Стойка системы управления плазмой	1	Напольное (S6)	2200×600×400
5	Стойка противоаварийной защиты и синхронизации	1	Напольное (S7)	2200×600×400
6	Стойка подсистемы сбора данных ЭМД	2	Напольное, уровень «0», вблизи от используемых диагностических патрубков (S10)	2200×600×400,
7	Стойка подсистемы сбора данных ДМРИ	1	Напольное, уровень «0», вблизи от используемых диагностических патрубков (S11)	2200×600×400
8	Стойка подсистемы сбора данных ДПРП, ДТМ	1	Напольное, уровень «0», вблизи от используемых диагностических патрубков (S12)	2200×600×400
9	Блок измерения и первичной обработки одноканального интерферометра	1	Встроенный, входит в состав диагностической аппаратуры	350×600×200
10	Блок измерения и первичной обработки радар-рефлектометра	1	Встроенный, входит в состав диагностической аппаратуры	350×600×200
11	Стойка устройств сбора данных о параметрах ВЧ-генераторов	1	Напольное, уровень «0», по месту размещения генераторных блоков	2200×600×400
	Итого	11		

*Примечания: ЭМД – электромагнитная диагностика; ДМРИ – диагностика мягкого рентгеновского излучения; ДПРП – диагностика полных радиационных потерь; ДТМ – тензометрическая диагностика.*

Оборудование САЭ КТМ располагается преимущественно в стойках стандарта ЕвроМеханика 19". Вид стойки представлен на рис. 3.3.

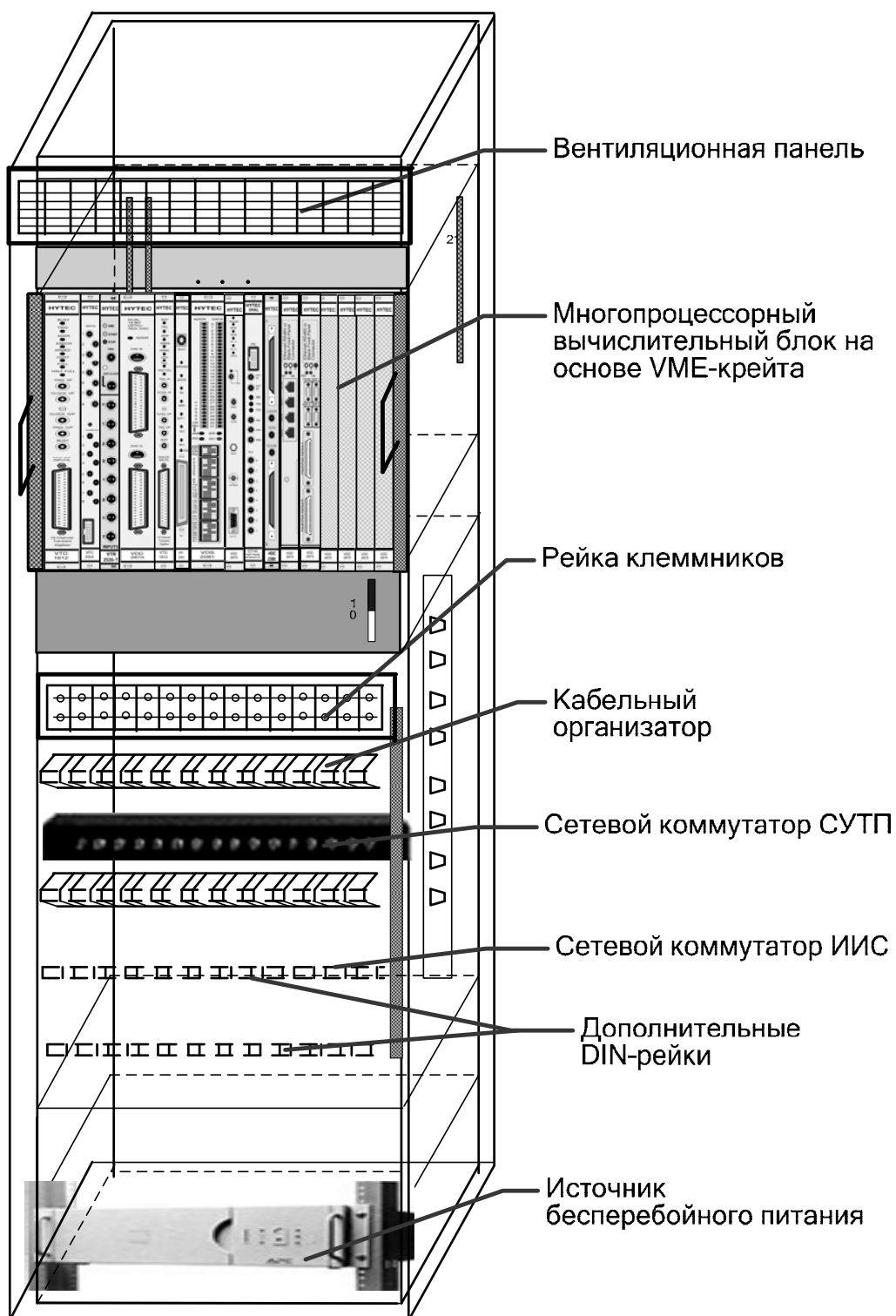


Рис. 3.3. Общий вид стойки СУП

### **3.3. Структура программного обеспечения верхнего уровня САЭ КТМ**

Разрабатываемое программное обеспечение характеризуется сложной структурой взаимодействия между отдельными частями, необходимостью выполнения отдельных задач в строго фиксированные промежутки времени, в соответствии со сценарием эксперимента. Этот факт ставит перед разработчиками необходимость решения задач программирования и разработки эффективной структуры (архитектуры) программного обеспечения.

В создаваемой СУТП функциональные задачи исполняются в нескольких вычислительных узлах, поэтому наиболее целесообразным будет создание программного комплекса, повторяющего структуру технических средств.

Общая структурная схема программного обеспечения СУП, с учётом вышесказанного, представлена на рис. 3.4. Она состоит из следующих основных частей: программное обеспечение технологических и диагностических подсистем I уровня, программное обеспечение ЭВМ стойки СУТП, осуществляющей общее управление процессом вакуумно-технологической подготовки, программное обеспечение ЭВМ стойки СУП для управления источниками питания электромагнитной системы (ЭМС), программное обеспечение ЭВМ стойки синхронизации и противоаварийной защиты, выполняющей координацию работы систем управления, синхронизацию её блоков, а также функции защит и блокировок.

Важное место в структуре программного обеспечения данной САЭ занимает ПО верхнего уровня. Так, оно состоит из сервера доступа к оперативным данным информационно-измерительной системы, выполняющего функции сбора данных и буферизации измерительной информации, передачи информации в систему управления плазмой, систему аварийной защиты и на пульта операторов.

Пульты операторов (оператора-технолога и общего управления экспериментом) снабжены мониторами реального времени на базе SCADA-системы Trace Mode под управлением операционной системы Windows NT. Мониторы реального времени, взаимодействуя со стойками II уровня и сервером доступа к оперативным данным, получают технологическую информацию и представляют её в виде мнемосхем, организуют эффективное взаимодействие оператора с технологическим процессом через удобный пользовательский интерфейс.



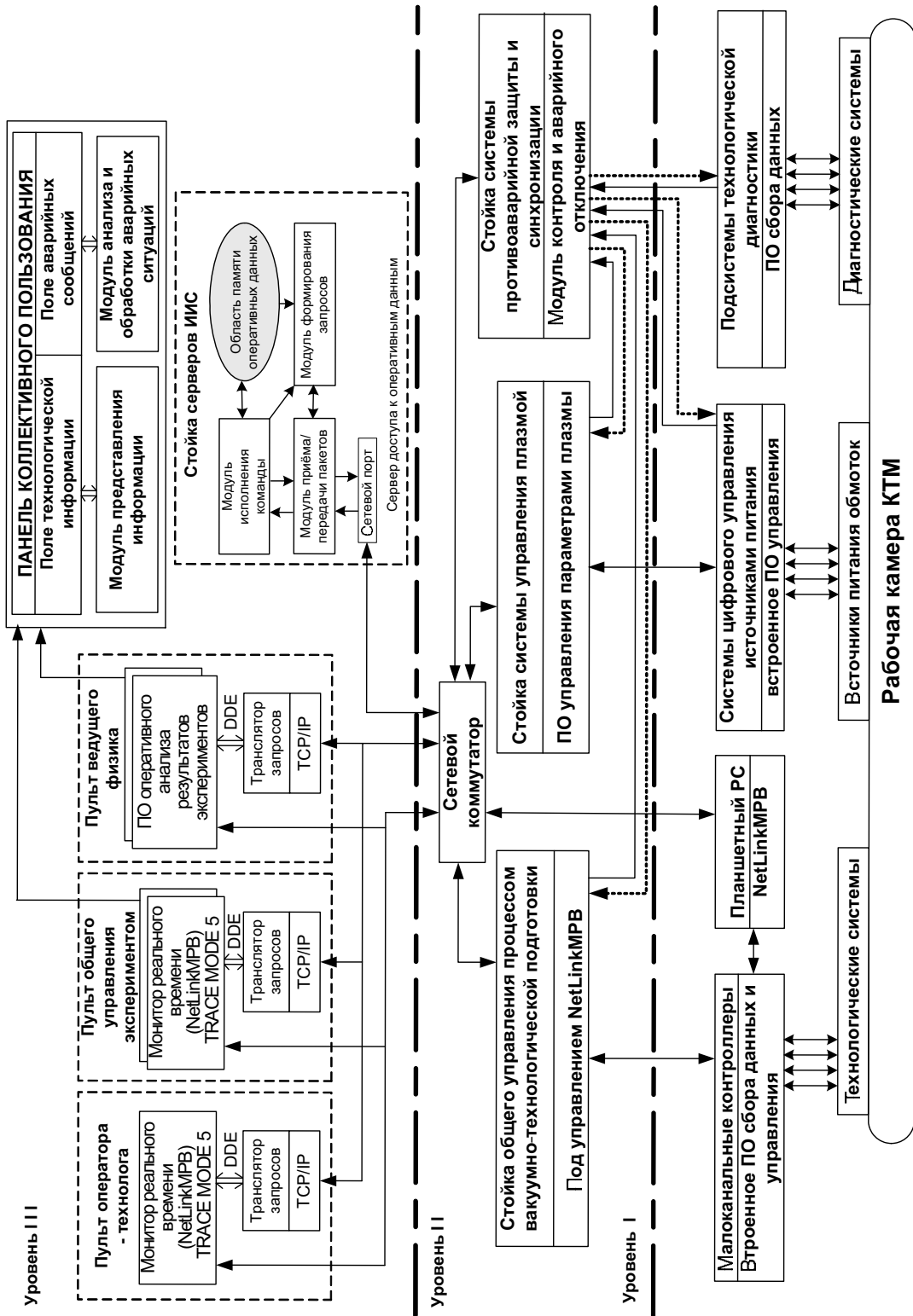


Рис. 3.4. Архитектура программного обеспечения САЭ ТОКАМАКА КТМ

Выбор SCADA-системы Trace Mode обусловлен следующими её особенностями:

- модульная структура;
- 0,001 с – минимальный цикл системы;
- открытый формат драйвера для связи с любым УСО;
- разработка распределенной АСУТП как единого проекта;
- поддержка единого сетевого времени;
- средства программирования контроллеров и АРМ на основе международного стандарта IEC 61131-3;
- более 200 типов форм графического отображения информации, в том числе тренды, мультипликация на основе растровых и векторных изображений, объекты ActiveX;
- просмотр архивной информации в реальном времени в виде трендов и таблиц;
- сеть на основе сетевых протоколов Netbios, NetBEUI, IPX/SPX;
- обмен с независимыми приложениями с использованием OPC client/server, DDE/NetDDEclient/server, SQL/ODBC, DCOM;
- автоматическое резервирование архивов и автовосстановление после сбоя;
- Trace Mode является отечественной SCADA-системой.

Программное обеспечение сервера доступа к оперативным данным состоит из следующих основных частей: модуль приёма/передачи сетевых пакетов по протоколу TCP/IP, модуль исполнения поступившей команды и управления оперативными данными, область оперативных данных и модуль формирования запросов к технологическим контроллерам или ЭВМ подсистемы управления. Область оперативных данных представляет собой динамическую базу данных, в которую помещается информация о технологических параметрах. Такая структура программного обеспечения, использующая клиент-серверную архитектуру, позволит разделить информационные потоки, циркулирующие в системе, предотвратить дублирование запросов экспериментальной информации, уменьшить трафик сети за счет оптимизации запросов, а также организовать эффективную систему ведения архивов технологической информации. Открытая архитектура сервера доступа к оперативным данным, позволит с легкостью проводить дальнейшую его модификацию и настройку за счет использования динамически загружаемых библиотек (DLL-библиотек), в которые можно добавлять новые пользовательские функции и алгоритмы.

Для реализации связи различных программ верхнего уровня, в том числе и SCADA-системы, с сервером доступа к оперативным данным, на клиентских машинах используется транслятор, который осуществляет прием программных запросов по широко используемому в настоящее время протоколу DDE, преобразование их в формат, удобный для последующей передачи по сетевому протоколу гарантированной доставки TCP/IP, прием пакетов от сервера и их передачу функциональным программам также по механизму DDE. Использование транслятора запросов позволит унифицировать доступ к информации любым функциональным программам, работающим под управлением различных операционных систем, поддерживающих протокол передачи данных TCP/IP. Следует также заметить, что необходимость транслятора запросов отпадет при использовании новой версии Trace Mode 6, так как в данной версии ПО для организации сетевого обмена используется транспортный протокол TCP/IP. За счет этого появится возможность осуществления прямой связи SCADA-системы с сервером доступа к оперативным данным.

При такой архитектуре программного обеспечения САЭ ТОКАМА-Ка КТМ предлагается следующий алгоритм взаимодействия частей ПО верхнего уровня (рис. 3.5). Транслятор запросов, работая в непрерывном режиме, взаимодействует с монитором реального времени Trace Mode 5 в соответствии с алгоритмом 1 и 2. По сигналу от таймера программы с периодом А происходит вызов алгоритма 1, в котором осуществляется операция чтения строки базы каналов транслятора<sup>1</sup>. Строка содержит информацию о символьном идентификаторе контроллера, имени канала проекта Trace Mode, команде, имени переменной контроллера, номере этой переменной, новом значении переменной или вектора (массива значений), старом значении вектора. Если выявлена команда на запрос значения переменной (команда «R»), то совершается формирование пакета данных и его передача по механизму DDE монитору реального времени. Быстро меняющиеся в течение разряда параметры плазмы накапливаются в стойке СУП. При этом ЭВМ СУП способна передавать вектор этих параметров. В каждый момент времени вектор будет увеличиваться, сохраняя свою историю. Чтобы предотвратить повтор передачи устаревшей информации в монитор реального времени, в базе кана-

---

<sup>1</sup>Период работы всех таймеров задан минимально возможным, поэтому цикл запуска алгоритмов определяется суммарным временем их исполнения.

лов транслятора введены поля для хранения старого и нового значения вектора. Если выявлена команда на запрос вектора (команда «V»), то транслятор сравнивает новое и старое значения вектора, и при обнаружении отличий формирует пакет данных и производит его передачу в монитор реального времени. При наличии команды «W» (посылка значения) из базы каналов транслятора читается следующая строка. Одновременно транслятор запросов выполняет алгоритм 2, запускаемый на исполнение по сигналу таймера с периодом Б. Этот алгоритм производит приём данных по механизму DDE от MPB Trace Mode, их анализ и запись в базу каналов транслятора в случае команды «W» для последующей передачи серверу сбора данных.

По сигналу таймера с периодом В осуществляется вызов алгоритма 3, где происходит чтение строки базы каналов транслятора, формирование сетевого пакета и его отправка серверу. С поступлением ответного кадра от сервера вызывается алгоритм 4.

Сервер оперативных данных, приняв запрос от транслятора, производит его обработку и запись в очередь запросов (алгоритм 5).

По сигналу таймера с периодом Г алгоритмом 6 исполняется чтение значений переменных или их векторов из очереди запросов, формируется сетевой пакет и отправляется транслятору запросов.

Алгоритм 7 осуществляет обработку очереди запросов по сигналу таймера с периодом Д. По команде «W» происходит обращение к библиотеке динамической загрузки, где формируется кадр запроса к контроллеру на изменение значения переменной. По команде «R» или «V» ведется поиск значения переменной или её вектора в области оперативных данных и заполнение очереди запросов.

Алгоритм 8 осуществляет заполнение новыми данными области оперативных данных. Алгоритм активируется по сигналу таймера с периодом Е. Алгоритм 8 выполняет поиск имен переменных в области оперативных данных и формирует запрос к библиотеке динамической загрузки для обновления значений.

При этом в библиотеке динамической загрузки происходит формирование кадра запроса на чтение значения переменной или её вектора, который пересылается к контроллерам или ЭВМ нижнего уровня, управляющим технологическими подсистемами.

Полученный ответный кадр от контроллера или ЭВМ подсистемы управления, согласно алгоритму 9, обрабатывается и нужная информация о состоянии переменной записывается в область памяти оперативных данных.



Одной из основных функций современных систем автоматизации экспериментов (САЭ) является обеспечение интерфейса пультов операторов и панели коллективного пользования на основе графических мнемосхем технологической информации с ведением необходимых персоналу форм отчетной документации. Практически любая САЭ предъявляет повышенные требования к функциям визуализации экспериментальных данных как в режиме послеэкспериментальной обработки, так и в реальном масштабе времени проведения эксперимента. Многие параметры исследуемых процессов в системе автоматизации экспериментов описываются достаточно сложными функциями, зависящими как от пространственных, так и временных координат. Графическое представление таких функций с хорошим пространственным и временным разрешением и возможностью его гибкого изменения является сложной технической задачей, для решения которой часто необходимо разрабатывать дополнительное программное обеспечение, расширяющее функции SCADA-систем по отображению технологической информации.

Решение проблемы – в создании программных компонент. Программная компонента – это повторно используемые части кода и данных в двоичной форме, которые могут быть вставлены в другие программные компоненты от разных производителей. Программные компоненты должны иметь возможность соединяться в соответствии с неким внешним двоичным стандартом, но их внутренняя реализация не ограничена. Они могут быть созданы с использованием процедурных языков, объектно-ориентированных языков или оболочек и т.п.

В настоящее время наиболее популярным решением, обеспечивающим производство программных компонент, является технология ActiveX. ActiveX предлагает расширяемые механизмы, которые дают возможность разработчикам программного обеспечения паковать функциональность в программные компоненты. ActiveX – расширяемая архитектура, основанная на множестве ключевых, приспособляемых к требованиям пользователя сервисов, каждый из них обеспечивает создание пользовательских сервисов любой сложности. Все сервисы, вне зависимости от их сложности реализации, места в области памяти могут быть использованы всеми приложениями, ОС, либо другими сервисами. ActiveX – это не технология для написания частей приложения. ActiveX применяется для совместного использования частей приложения с чем-либо еще и для доступа к таким разделяемым компонентам. Таким образом, создаваемые элементы визуализации

технологической информации должны базироваться на стандарте технологии ActiveX, которая позволяет использовать реализованные компоненты в любом программном продукте, поддерживающим элементы управления ActiveX, создавать элементы визуализации с качественным пользовательским интерфейсом и обеспечивать их модификацию в дальнейшем.

С использованием данной технологии были созданы основные элементы визуализации, расширяющие функции SCADA-системы Trace-Mode по отображению технологической информации. Примеры мнемосхем с использованием отмеченных компонентов представлены в разделе 3.3.1.

### **3.3.1. Структура верхнего уровня САЭ ТОКАМАКа КТМ**

Верхний уровень (уровень III) САЭ ТОКАМАК КТМ включает следующее:

- многотерминальный пульт главного оператора КТМ, который состоит из пульта общего управления экспериментом на базе центральной ЭВМ СУТП, пульта промышленного телевидения, пульта оператора-технолога и пульта ведущего физика, обеспечивающих визуализацию на мнемосхемах параметров технологических систем;
- панель коллективного пользования (ПКП), на которой отображается мнемосхема комплекса установки КТМ, предупредительная и аварийная сигнализация, а также представляются основные параметры эксперимента;
- стойка серверов информационно-измерительной системы (ИИС).

Основными функциями третьего уровня СУТП являются: объединение в одну управляющую систему всего технологического оборудования КТМ: обработка, регистрация, представление технологической информации на графических мнемосхемах и ее документирование; анализ аварийных ситуаций, формирование сообщений предупредительной сигнализации, отработка алгоритмов общей аварийной защиты КТМ. На серверах сбора данных и управления технологическими подсистемами II уровня (промышленных компьютерах) концентрируются данные, поступающие от микропроцессорных контроллеров I уровня. Для передачи технологической информации подсистемам три уровня, а также для ведения архива используется ЭВМ доступа к данным и архивирования ИИС. Применяется для концентрации информации, получаемой от

серверов сбора II уровня, а также для обеспечения связи между подсистемами III уровня, такими как ЭВМ общего управления экспериментом, подсистемой анализа и обработки аварийных ситуаций, технологическими пультовыми и подсистемами II уровня.

Панель коллективного пользования представляет собой две плазменные панели PDS6101W-S фирмы Fujitsu, имеющие следующие телевизионные входы: S-Video, Composite RCA, а также компьютерные входы: RGBHV и 15-pin Control: RS-232C. Для связи панелей с пультами операторов используется S-Video соединение. Подключение по интерфейсу S-Video обеспечивает более высокое качество, чем при использовании композитного соединения RCA, широко применяемого ранее. Достигается это тем, что яркостный сигнал, несущий и синхроимпульсы, передаётся отдельно от цветового сигнала, в результате чего исчезают цветовые перекрёстные искажения, возникающие при композитном подключении и повышенной до 6 МГц полосой пропускания, чем обеспечивается чёткость до 500 линий. Для реализации данного соединения используется видеокарта Radeon с двумя встроенными контроллерами памяти и S-Video выходом (например, Radeon 9000Pro или 9200LE), что позволяет организовать два независимых экрана: экран оператора и ПКП с возможностью вывода экрана ПКП на TFT-панель по S-Video соединению. Кабель, используемый для соединения, должен обладать волновым сопротивлением 75 Ом и низким затуханием порядка  $10^{-2}$  дБ/м в расчете на 5 м (среднее расстояние от пультов до панелей с запасом).

На первый экран панели коллективного пользования (рис. 3.6, 3.7) выводится информация о процессе подготовки рабочей камеры ТОКА-МАКа КТМ, в режиме подготовки и информация о результатах эксперимента в реальном времени протекания разряда, в режиме пуска: операции прогрева камеры, операции очистки камеры тлеющим разрядом и операции боронизации рабочей камеры.

Мнемосхема подготовки рабочей камеры панели коллективного пользования предоставляет операторам следующую информацию:

- значение температуры в 100 точках поверхности камеры (по 2 точки на каждый сектор камеры);
- аварийное сигнализирование при превышении температурой заданной величины;
- величину тока и напряжения в цепях тлеющего разряда;
- значение давления в баллонах с гелием, водородом, дейтерием и другими рабочими газами, используемыми в процессе подготовки РК и боронизации;



- значение абсолютного давления в РК от системы высоковакуумной откачки;
- состояние отсечных клапанов системы газонапуска;
- аварийное сигнализирование в случае возникновения неисправностей в работе источника питания тлеющего разряда.

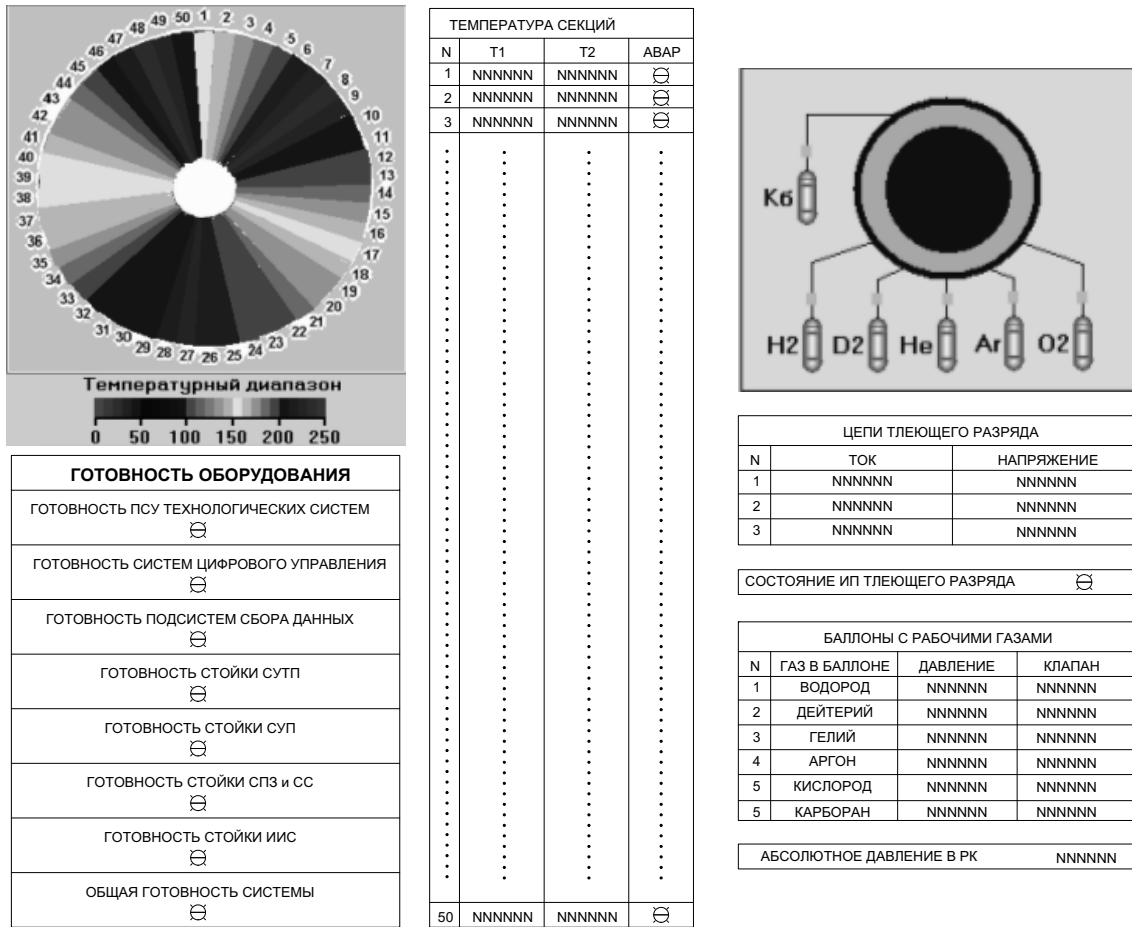
Мнемосхема системы управления плазмой панели коллективного пользования предоставляет операторам следующую информацию:

- распределение плотности тока в поперечном сечении камеры в виде 3D-графика;
- изменение токов обмоток TF, PF, OH, CS во времени в виде 2D-графика;
- изменение тока плазмы на плато во времени в виде 2D-графика;
- смещение плазмы по вертикали и горизонтали;
- величина отношения среднего газокинетического давления плазмы к давлению полоидального магнитного поля;
- плотность электронов плазмы;
- температура электронов на плато тока;
- состояние источников питания обмоток;
- состояние внешнего и внутреннего люка камеры;
- состояние системы аварийной защиты;
- общая готовность системы;
- аварийное сигнализирование неисправности в системе управления плазмой.

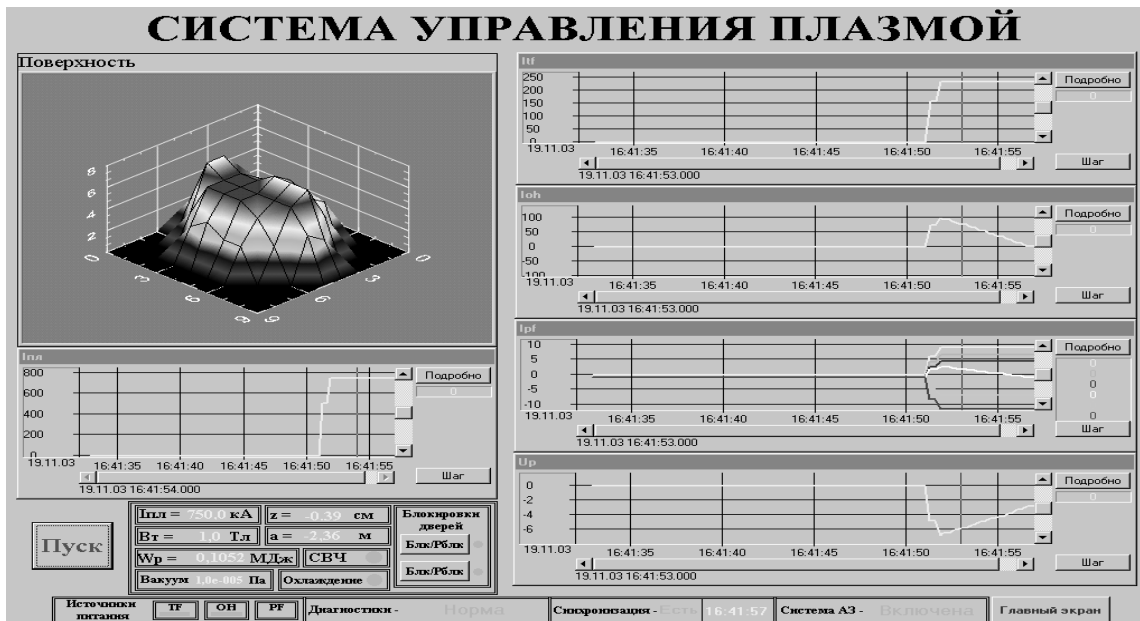
На второй экран панели коллективного пользования (рис. 3.8) выводится информация о физических параметрах плазмы:

- изменение тока плазмы на плато во времени в виде 2D-графика;
- изменение плотности электронов плазмы;
- изменение температуры электронов на плато тока;
- изменение величины отношения среднего газокинетического давления плазмы к давлению полоидального магнитного поля;
- положение плазмы в камере и другие интегральные параметры плазмы.

## СИСТЕМА ПОДГОТОВКИ РАБОЧЕЙ КАМЕРЫ



*Рис. 3.6. ПКП, система подготовки рабочей камеры*



*Рис. 3.7. ПКП, система управления плазмой*

## ФИЗИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ ПЛАЗМЫ

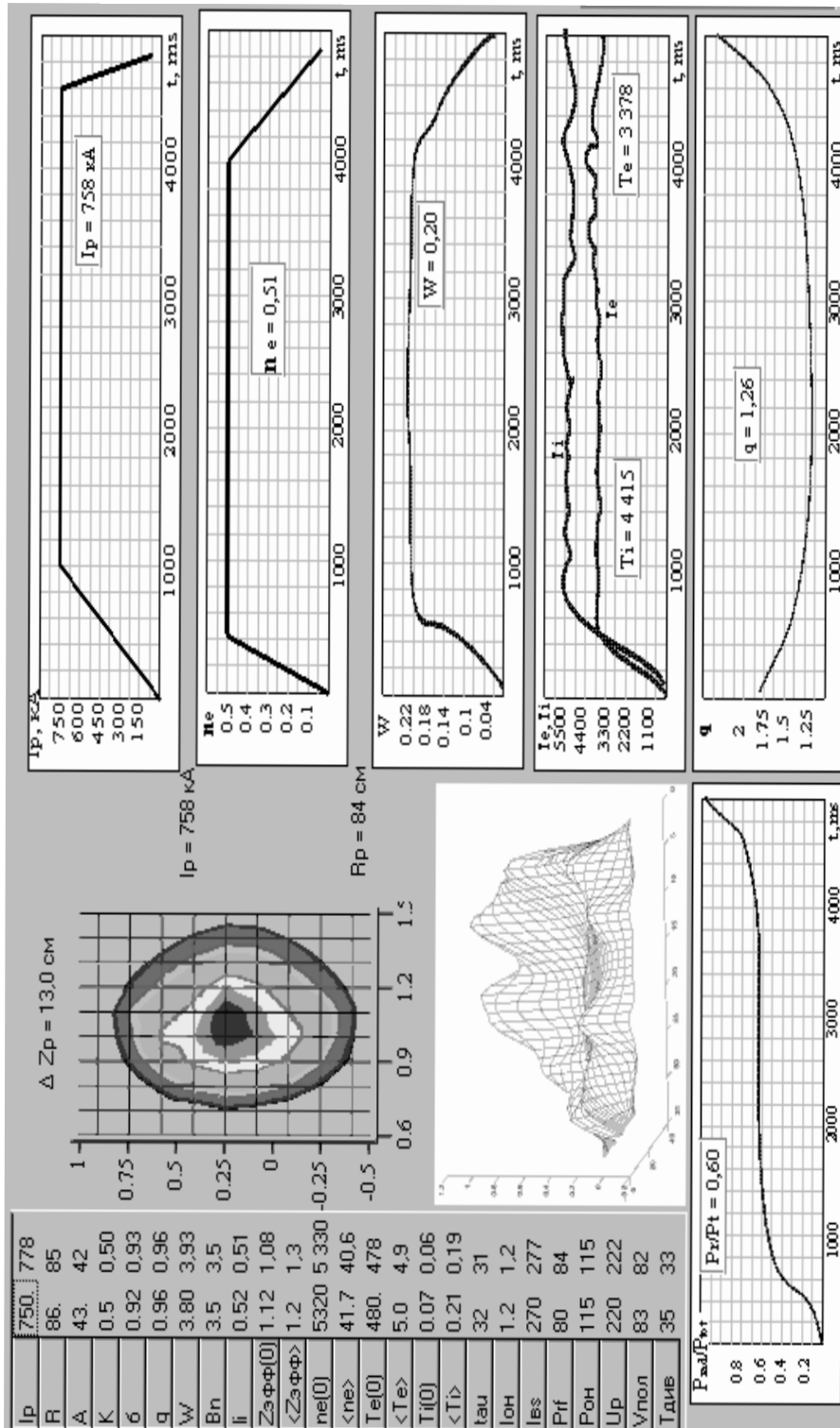
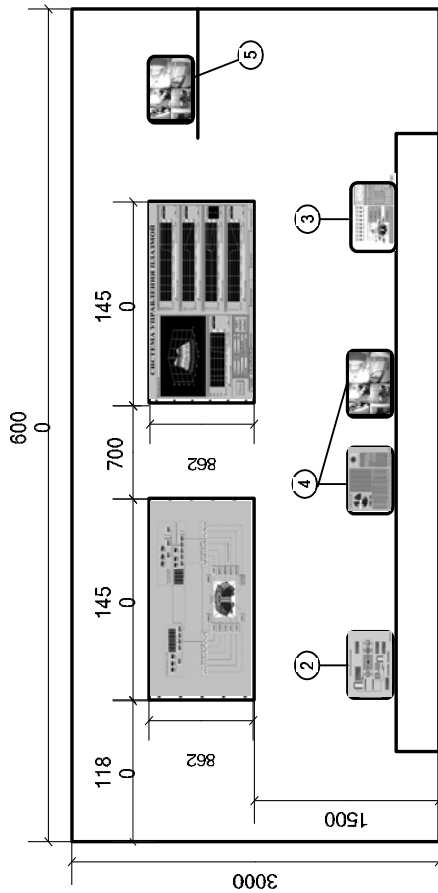


Рис. 3.8. ПКП, физические параметры плазмы

### **3.3.2. Пультовая системы автоматизации экспериментов**

Пультовая системы автоматизации экспериментов представляет многомашинный комплекс, предназначенный для организации рабочих мест операторов и инженеров-исследователей, управляющих ходом экспериментов на ТОКАМАКе КТМ. Основными функциями третьего уровня СУТП являются: объединение в одну управляющую систему всего технологического оборудования КТМ и обработка, регистрация, представление технологической информации на графических мнемосхемах и ее документирование; анализ аварийных ситуаций, формирование сообщений предупредительной сигнализации, отработка алгоритмов общей аварийной защиты КТМ. Пультовая система включает в свой состав следующее (рис. 3.9):

- ЭВМ пульта оператора-технолога. Пульт предназначен для управления операциями вакуумно-технологической подготовки камеры к экспериментам и поддержания регламентных значений технологических параметров;
- ЭВМ пульта общего управления экспериментом. Пульт обеспечивает управление установкой КТМ в пусковом режиме работы и отображение информации о работе систем ТОКАМАКа, задействованных в режиме пуска;
- панель коллективного пользования (на основе 2-х 61" плазменных панелей), предназначенную для отображения больших объемов динамической информации о состоянии стендового комплекса и ходе экспериментальных исследований. Использование больших экранов, размещенных на стене в пультовой позволяет повысить эффективность работы операторов и существенно сократить сроки принятия решений в критических ситуациях;
- ЭВМ пульта ведущего физика. Пульт предназначен для отображения основных параметров плазменного разряда, которые были получены в результате эксперимента и для корректировки программы последующих пусков;
- экран промышленного телевидения, предназначенный для отображения информации системы многокамерного видеонаблюдения с возможностью архивирования видеоинформации о состоянии помещений установки ТОКАМАК КТМ.



- 1 - Панель коллективного пользования
- 2 - Пульт ведущего физика
- 3 - Пульт оператора-технолога
- 4 - Пульт общего управления экспериментом (2 экрана)
- 5 - Экран промышленного телевидения
- 6 - Операторский стол

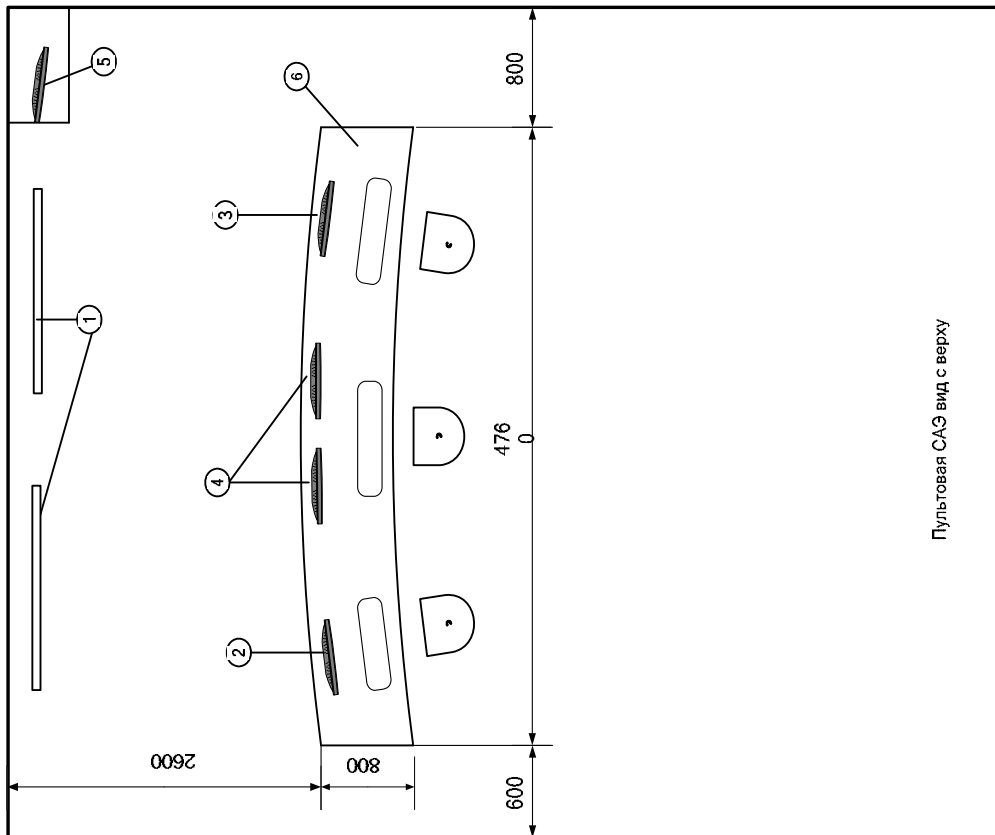


Рис. 3.9. Пультовая САЭ

### 3.4. Архитектура локальной вычислительной сети САЭ КТМ

Локальная вычислительная сеть (ЛВС) САЭ КТМ должна обеспечить информационное взаимодействие вычислительных средств всех уровней системы. Необходимость передачи большого количества информации в ограниченные промежутки времени требует построения эффективной структуры взаимодействия всех систем стендового комплекса КТМ. Предлагаемая структура ЛВС приведена на рис. 3.10.

Коммутатор ИИС предназначен для связи диагностических систем с верхними уровнями ИИС. Коммутатор расположен в стойке системы противоаварийной защиты и непосредственно связан с коммутатором верхнего уровня САЭ.

Коммутатор СУП предназначен для связи цифровых систем управления с верхним уровнем СУП. Он расположен в стойке СУП и связан с коммутатором ИИС, а также с ЭВМ расчета заданий для источников питания.

Коммутатор исследовательской сети связан с коммутатором верхнего уровня САЭ и предназначен для организации доступа с рабочих станций исследователей к экспериментальным данным КТМ.

Коммутатор верхнего уровня САЭ расположен в стойке сервера ИИС и обеспечивает взаимодействие всех вычислительных средств САЭ КТМ. Кроме перечисленных выше узлов, к коммутатору верхнего уровня ИИС подключены: пульт оператора технолога (ПОТ), пульт ведущего физика (ПВФ) и пульт общего управления (ПОУ).

Связь с блоками управления технологического оборудования осуществляется по протоколу RS-485.

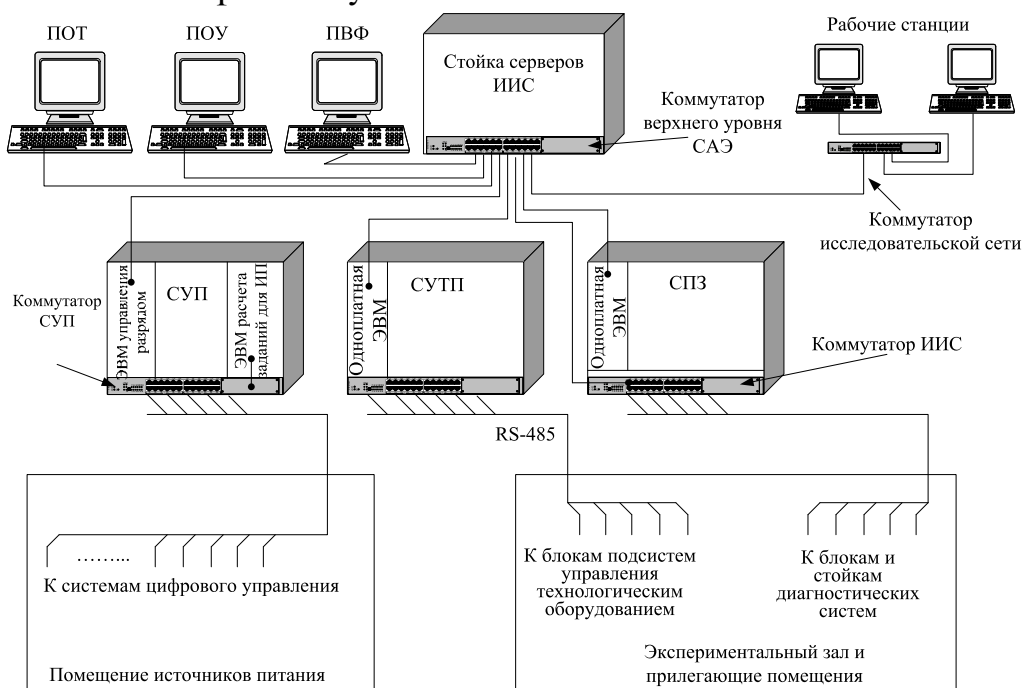


Рис. 3.10. Структурная схема локальной вычислительной сети КТМ

## СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Казахстанский материаловедческий токамак КТМ // Технический проект 1А.227.576ТП. – С.-Петербург, 2001. – Т. 1 – С. 66.
2. Казахстанский материаловедческий реактор КТМ. Система импульсного электроснабжения. Системы цифрового управления импульсными источниками питания // Технический проект КТМ.03.001-1-ЭИ. – Т. 3.10.4. – 2003. – С. 49, 149.
3. Thiss Wisnands, Geels Martin. An advanced plasma control system for Tore-Supra // Fusion technology. – V. 32. – 1997. – 18 p.
4. Ferron J. The isoflux shape control algorithm. <http://lithos.gat.com/pcs/isoflux/isoflux.html>.
5. Development of multivariable control techniques for use with DIII-D plasma control system // General Atomics report GA-A23151.
6. Real time equilibrium reconstruction for tokamak discharge control // General Atomics report GA-A22586. – P. 9–18.
7. Favez J.Y., Khayrutdinov R.R., Lister J.B., Lukash V.E. Comparing TCV experimental VDE responses with DINA code simulation // Plasma Physics and Controlled Fusion. – 2004. – V. 44. – № 2. – P. 32–40.
8. Lister Jonatan B., Hofmann Ferdinand, Moret Jean-Mark, Buhlmann Felix, Dutch Michael J., Fasel Damien, Farve Alain, Isox Pierre-Francois, Marletaz Blaise, Mamillod Philippe, Marti Yves, Perez Albert, Ward David J.. The control of tokamak configuration variable plasmas. Fusion Technology. – 1997. – V. 32. – P. 90–91.
9. Самойленко Ю.И. и др. Управление быстропротекающими процессами в термоядерных установках. – Киев: Наук. Думка, 1988. – 379 с.
10. Казахстанский материаловедческий ТОКАМАК КТМ. Отчет о выполнении работ за период июль-декабрь 2000 г. – М.: ТРИНИТИ, 2001. – 51 с.
11. Ясельский В.К., Байструков К.И., Павлов В.М. и др. Технико-экономическое обоснование реализации системы управления технологическими процессами (СУТП) термоядерной материало-ведческой установки КТМ. Научно-технический отчет. – Томск: Изд-во ТПУ, 1999. – Т. I. – 179 с.

12. Мирнов С.В. Физические процессы в плазме ТОКАМАКа. — М.: Энергоатомиздат, 1983. — 139 с.
13. Бейтман Г. МГД-неустойчивости. — М.: Энергоиздат, 1982. — 200 с.
14. Moret J.J.-M., Buhlman F., Fasel D., Hofmann F., Tonetti G. Magnetic measurements on TCV tokamak // Review of scientific instruments. — 1998. — V. 69. — № 6. — P. 17–20.
15. Орлинский Д.В. Общая характеристика комплекса диагностики плазмы на установке Т-15. Электромагнитные измерения, измерения плотности. Препринт ИАЭ-351817. — 1998. — 15 с.
16. Li X.B., Cross R.C. Measurement of plasma diamagnetism by a coil located inside a conducting wall // Review of scientific instruments. — 1994. — V. 65. — № 8. — 32 p.
17. Захаров Л.Е., Шафранов В.Д. Интегральные соотношения для равновесного тороидального плазменного шнура с некруглым сечением // Журнал технической физики. — 1986. — Т. XLIII. — Вып. 2.
18. Орлинский Д.В. и др. Общая характеристика комплекса диагностики плазмы на установке Т-15. Электромагнитные измерения, измерения плотности. Препринт ИАЭ-351817 1981. — 1985. — 13 с.
19. Kock L.C.J.M. De, Yu K. Report on the JAEA Technical Committee Meeting. — 2001. — № 15. — 35 p.
20. Ferron J.R., Walker M.L., Lao L.L., St. John H.E., Humphreys D.A., Leuter J.A. Real time equilibrium reconstruction for tokamak discharge control // Nuclear fusion. — 1998. — V. 38. — № 7. — P. 11-15.
22. Lee D.K., Peng Y.-K.M. An approach to rapid plasma shape diagnostics in tokamaks // Journal of plasma physics. 1981. — V. 25. — № 8. — P. 161-173.
23. Swain D.F., Neilson G.H. An efficient technique for magnetic analysis of non-circular, high-beta tokamak equilibria // Nuclear fusion. — 1982. — V. 22. — № 8. — P. 153.
24. Braams B.J. The interpretation of tokamak magnetic diagnostics // Plasma physics and controlled fusion. — 1991. — № 33. — P. 715.
25. Gruber O., et al. Position and Shape Control on ASDEX. Upgrade // Fusion technology. — 1993. — № 2. — P. 997.
26. Каминский А.О., Киловатая Т.Г., Кузнецов Ю.К., Ясин И.В. Точные и быстрые методы определения положения и формы плазмы в токамаке ИТЭр из внешних магнитных измерений // Физика плазмы. — Т. 20. — № 2. — С. 144.
29. Yoshino R., Nakamura Y., Neyatani Y., Plasma equilibrium control during slow plasma current quench with avoidance of plasma-wall interaction in JT-60U // Nuclear fusion. — 1997. — V. 37. — № 8. — P. 1007.



30. Том Р., Тарр Дж. Магнитные системы МГД-генераторов и термоядерных установок. — М: Энергоатомиздат, 1985. — 133 с.
31. Ferron J.R., Walker M.L., Lao L.L., Penaflor B.G., St. John H.E., Humphreys D.A., Leuer J.A. Real time equilibrium reconstructions. For control of the discharge. In the DIII-D TOKAMAK // General atomics report GA-A22637 July. — 1997. — P. 125–135.
32. Бритоусов Н.Н., Мишина Н.А., Щедров В.М. Система управления током плазмы на установке ТОКАМАК-10 // Доклады III Всесоюзной конференции по инженерным проблемам термоядерных реакторов. — СПб., 1984. — Т. 3. — С. 408–413.
33. Crisanti F. Neri C., Santinelli M. FTU plasma position and current feedback control // Rapp. Tech. ENEA. — 1990. — № 27. — С. 23–26.
34. Kurihara K., Matsukawa M., Kimura T., et al. Dynamics of plasma current control system in JT-60 // 12<sup>th</sup> Symp. Fus. Eng., Mounterey, Calif., Oct. 12–16, 1987; Proc V. 1. — New York, 1987. — P. 609–612.
35. Цифровая ЭВМ с реальным масштабом времени для регулирования формы и тока плазмы в ТОКАМАКе Tore Supra /Bottereau J.M., Couturier B // Fusion technol., 1988: Proc. 15<sup>th</sup> Symp., Ulreht, 19–23 Sept, 1988. — Amsterdam, 1989. — V. 2. — P. 1675–1679.
36. Рабинер Л., Гоулд Б. Теория и применение цифровой обработки сигналов. — М.: Мир, 1978. — 101 с.
37. Alladio F., Crisanti F., Mainucci M., P. Micozzi, Tanga A. Tokamak configuration analysis using the toroidal multipoles method // Rapp. Tech. EN- EA. — 1988. — № 31. — P. 91–99.
38. Ph van Milligen B., Lopez A. Fraguas Expanction of vacuum magnetic fields in toroidal harmonics. Comp. Phys. Comm. — 1994. — V. 81. — 74 p.
39. Справочник по специальным функциям / под редакцией М. Абрамовица и И. Стиган. — М.: Наука. — 1979. — 125 с.
40. Казахский материаловедческий ТОКАМАК КТМ. Эскизный проект. — М-СПб., 2000. — Т. 6. — 136 с.
41. Gorkom J.C. van, Pol M.J. van de, Donne A.J.H. The ten-channel pulsed radar reflectometer at the TEXTOR-94 tokamak // Rev. Sci. Instrum. — 2001. — V. 72(1). — P. 336–339.
42. Shevchenko V.F., Walsh M.J. First results from the small tight aspect ratio tokamak multifrequency pulse radar reflectometer // Rev. Sci. Instrum. — 1997. — V. 68(5). — P. 2040–2045.
43. Кунцман Ж. Численные методы. — М.: Наука, 1979. — 76 с.

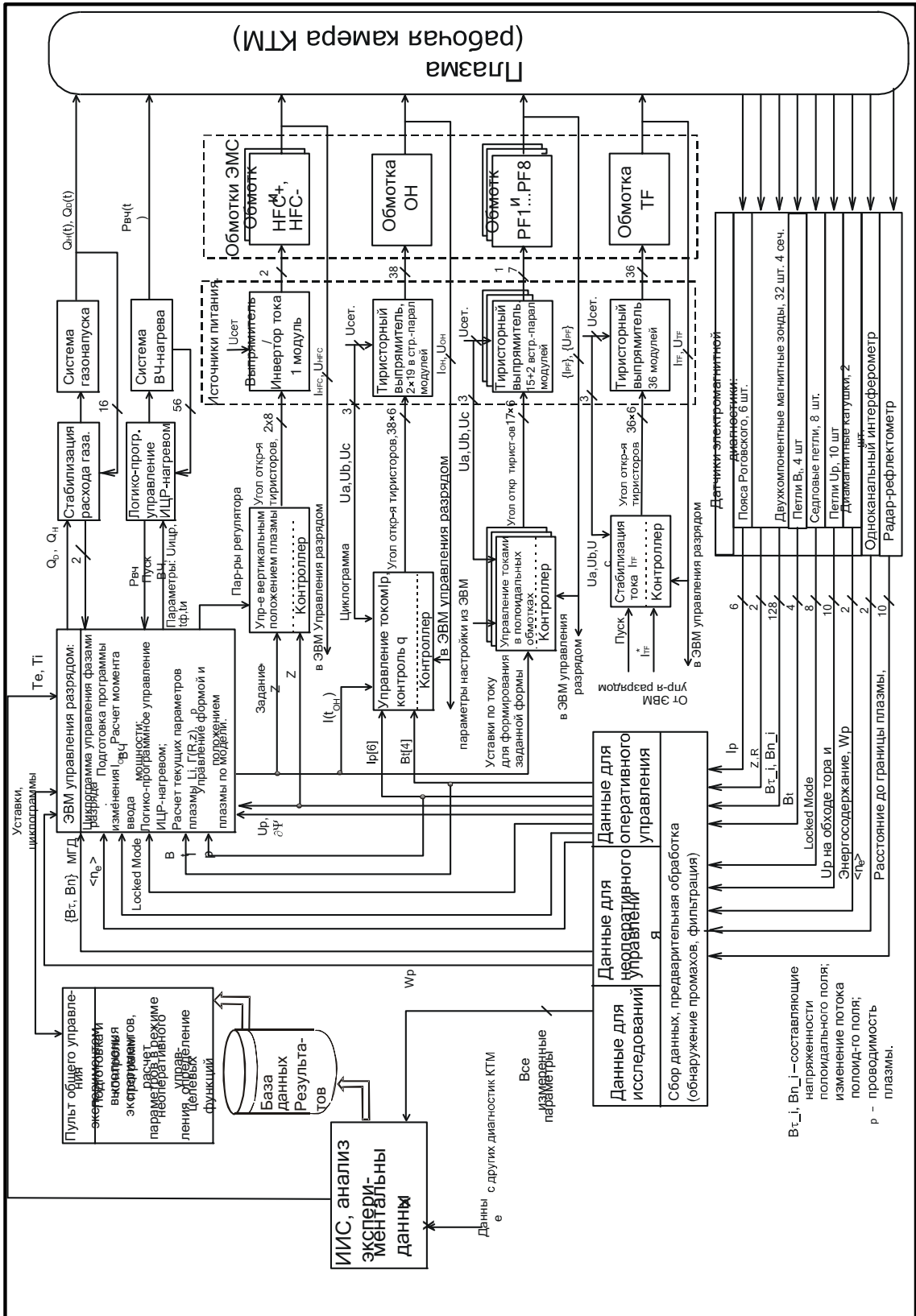


1	КТМ.03.001.001	Структурная схема системы управления
2	КТМ.03.001.002	Структурная схема контура управления формой и положением плазмы КТМ
3	КТМ.03.001.003.	Схема взаимосвязей измеряемых параметров
4	КТМ.03.001.004	Структурная схема подсистемы сбора данных электромагнитной диагностики
5	КТМ.03.001.005	Структурная схема САР тока
6	КТМ.03.001.006	Структура контура управления плотностью плазмы
7	КТМ.03.001.007	Функциональная схема установки ВЧ-нагрева плазмы ТОКАМАКа КТМ
8	КТМ.03.001.008	Алгоритм работы установки ВЧ-нагрева плазмы ТОКАМАКа КТМ
9	КТМ.03.001.009	Структурная схема системы управления установкой ИЦР-нагрева плазмы
10	КТМ.03.001.010	Функциональная схема ВЧ-нагрева плазмы (вариант источника анодного питания для модульной структуры)
11	КТМ.03.001.011	Блок-схема алгоритма работы КТМ

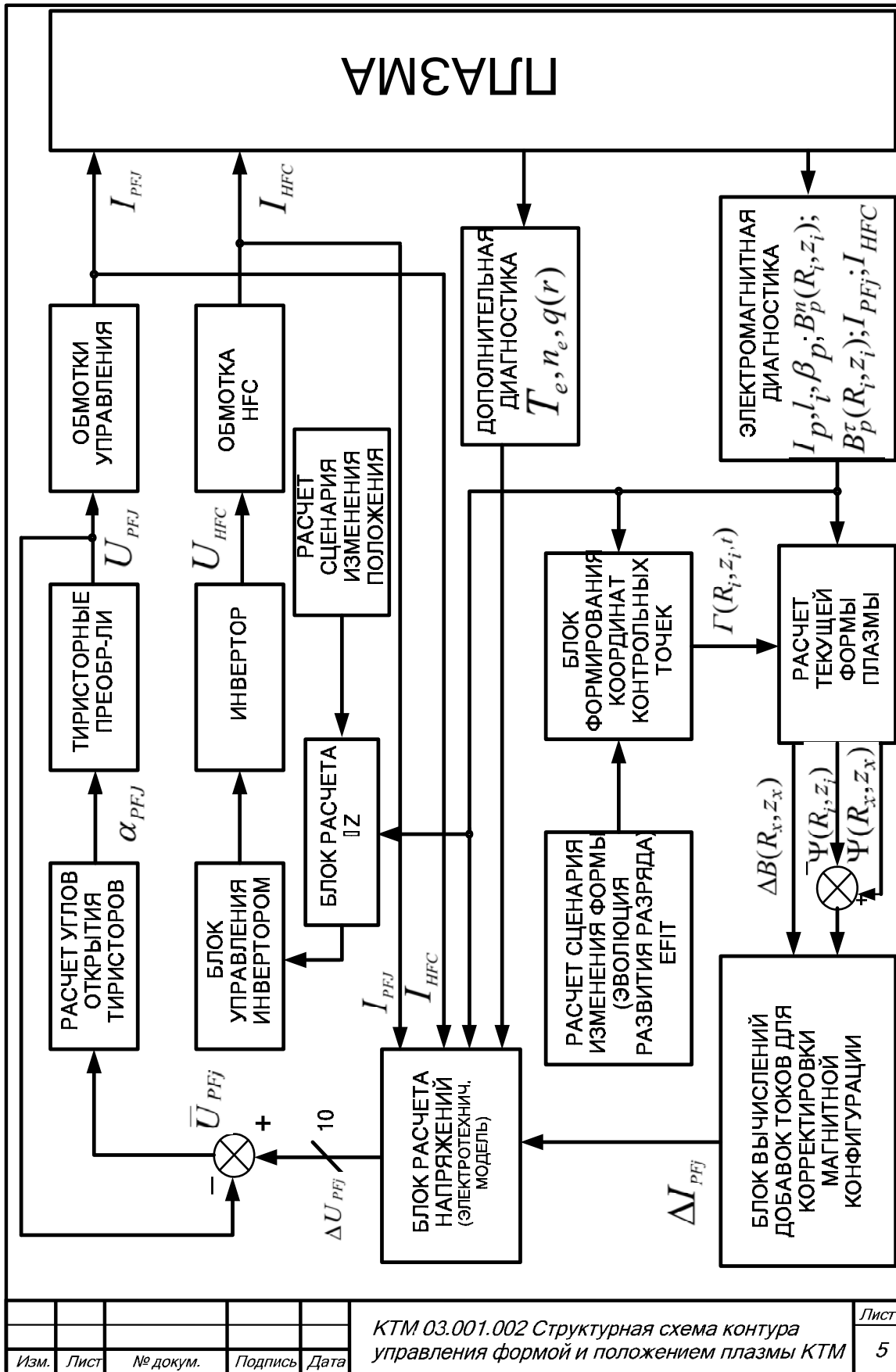
					<i>Ведомость чертежей</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпи</i>	<i>Да</i>		2

12	КТМ.03.001.012	Диаграмма состояний и переходов КТМ
13	КТМ.03.001.013	Алгоритм функционирования системы управления плазмой
14	КТМ.03.001.014	Структура комплекса технических средств СУП
15	КТМ.03.001.015	Архитектура программного обеспечения САЭ КТМ
16	КТМ.03.001.016	Алгоритм взаимодействия модулей программного комплекса САЭ
17	КТМ.03.001.017	Чертеж общего вида стойки СУП
18	КТМ.03.001.018	Видеограмма экрана пульта системы управления плазмой (экран 1)
19	КТМ.03.001.019	Видеограмма экрана пульта системы управления плазмой (экран 2)

					<i>Ведомость чертежей</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпи</i>	<i>Ла</i>		3



Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	КТМ 03.001.001 Структурная схема системы управления	Лист 4

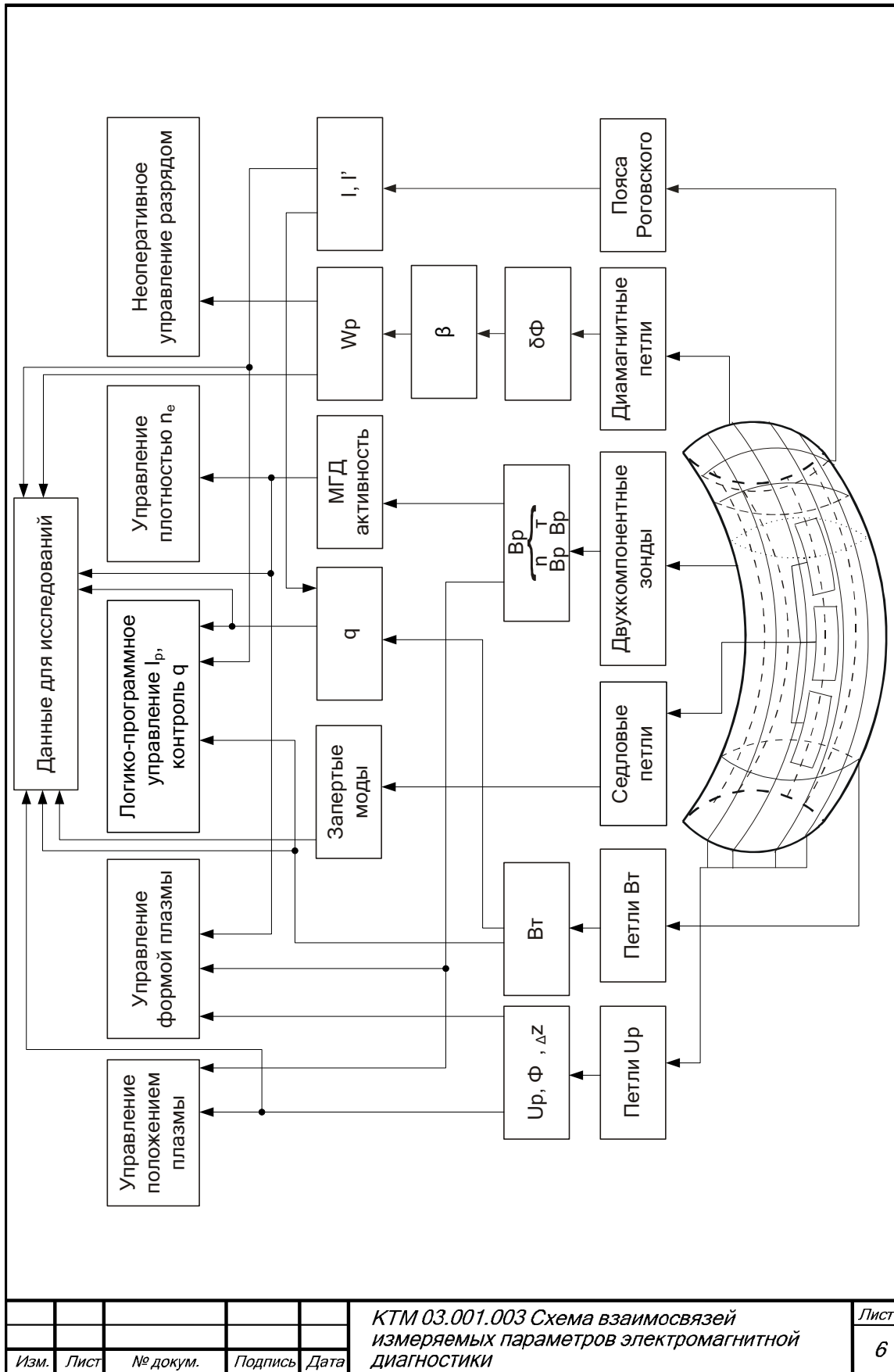


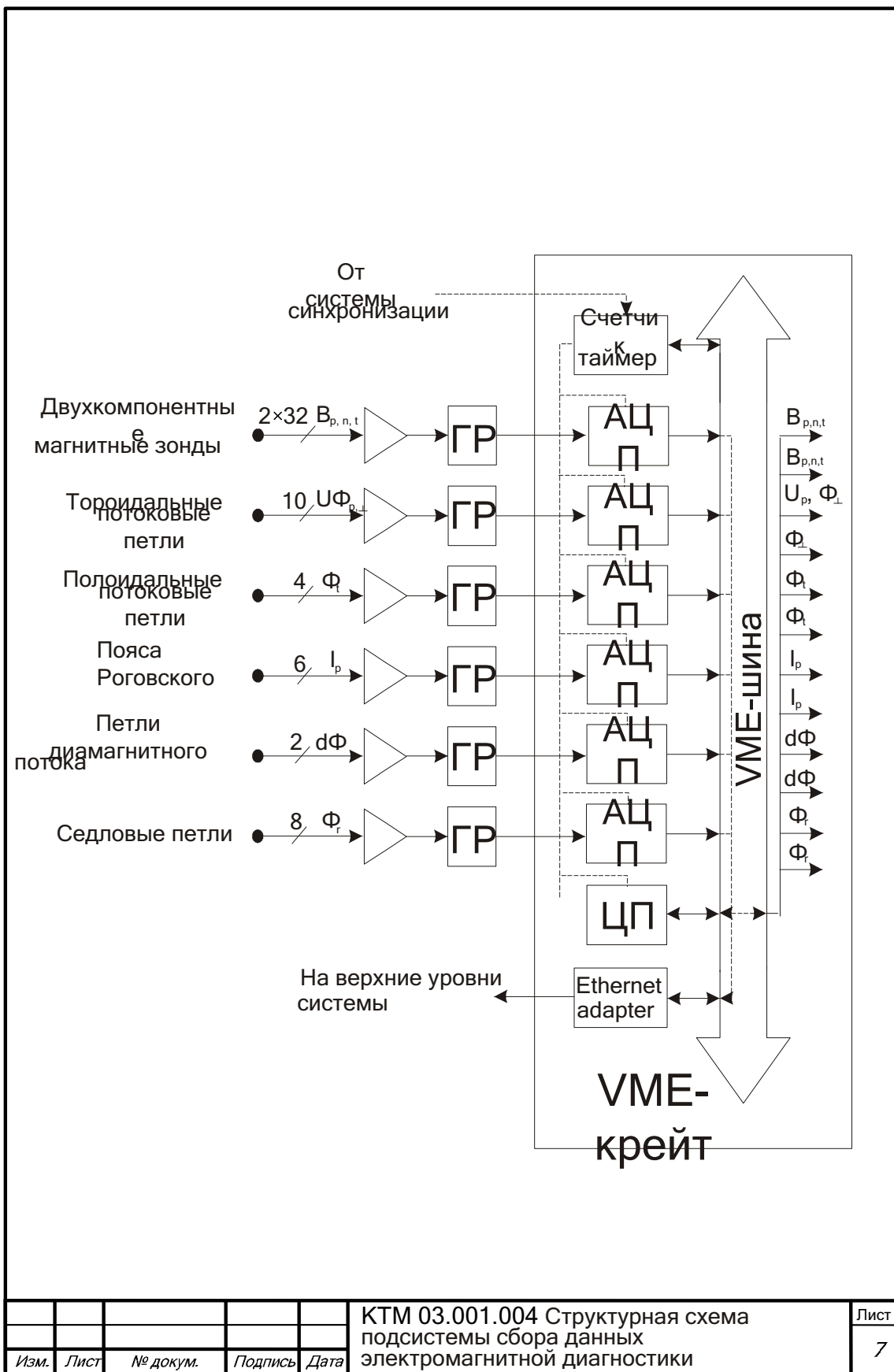
КТМ 03.001.002 Структурная схема контура управления формой и положением плазмы КТМ

Лист

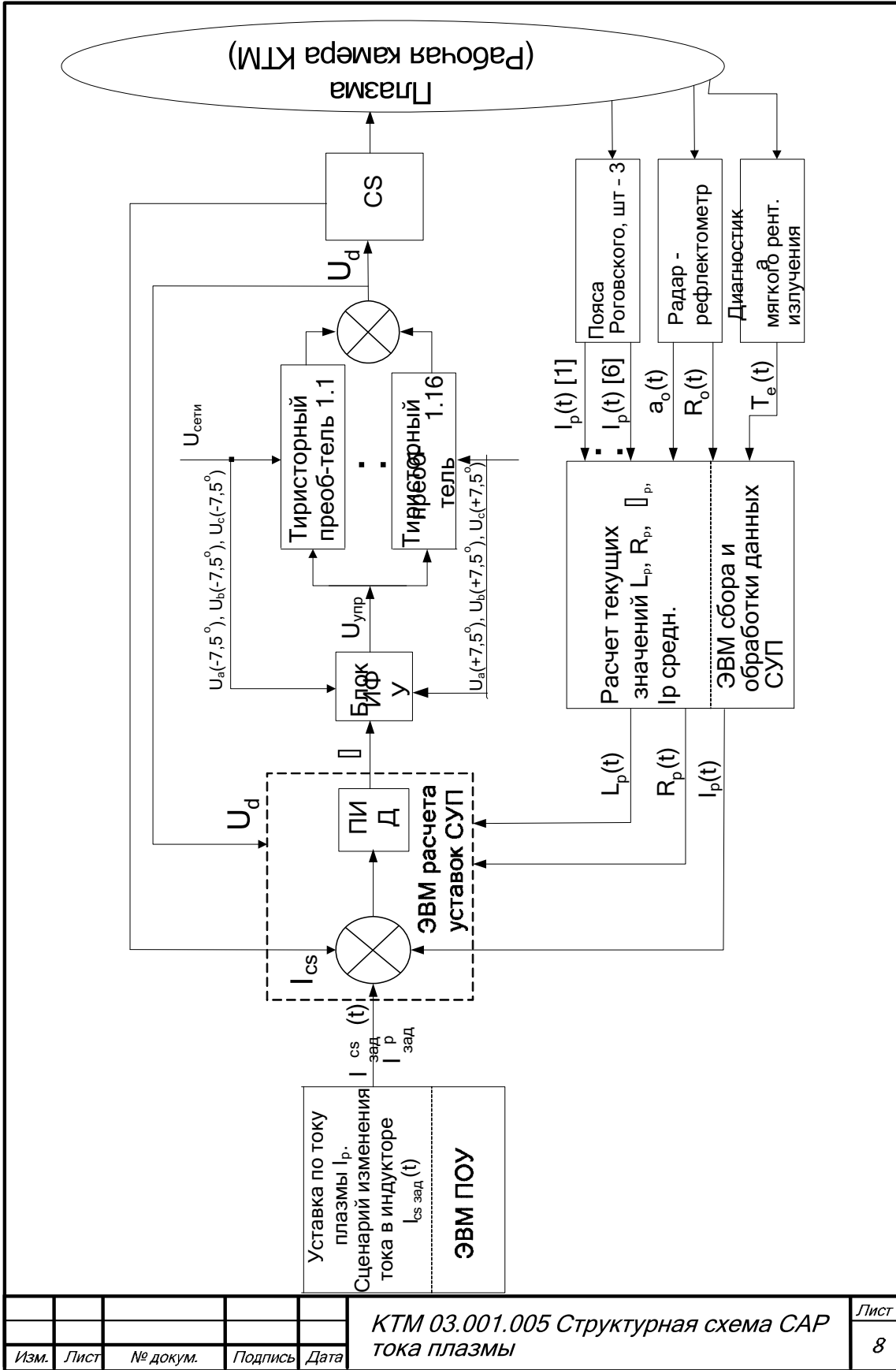
5

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

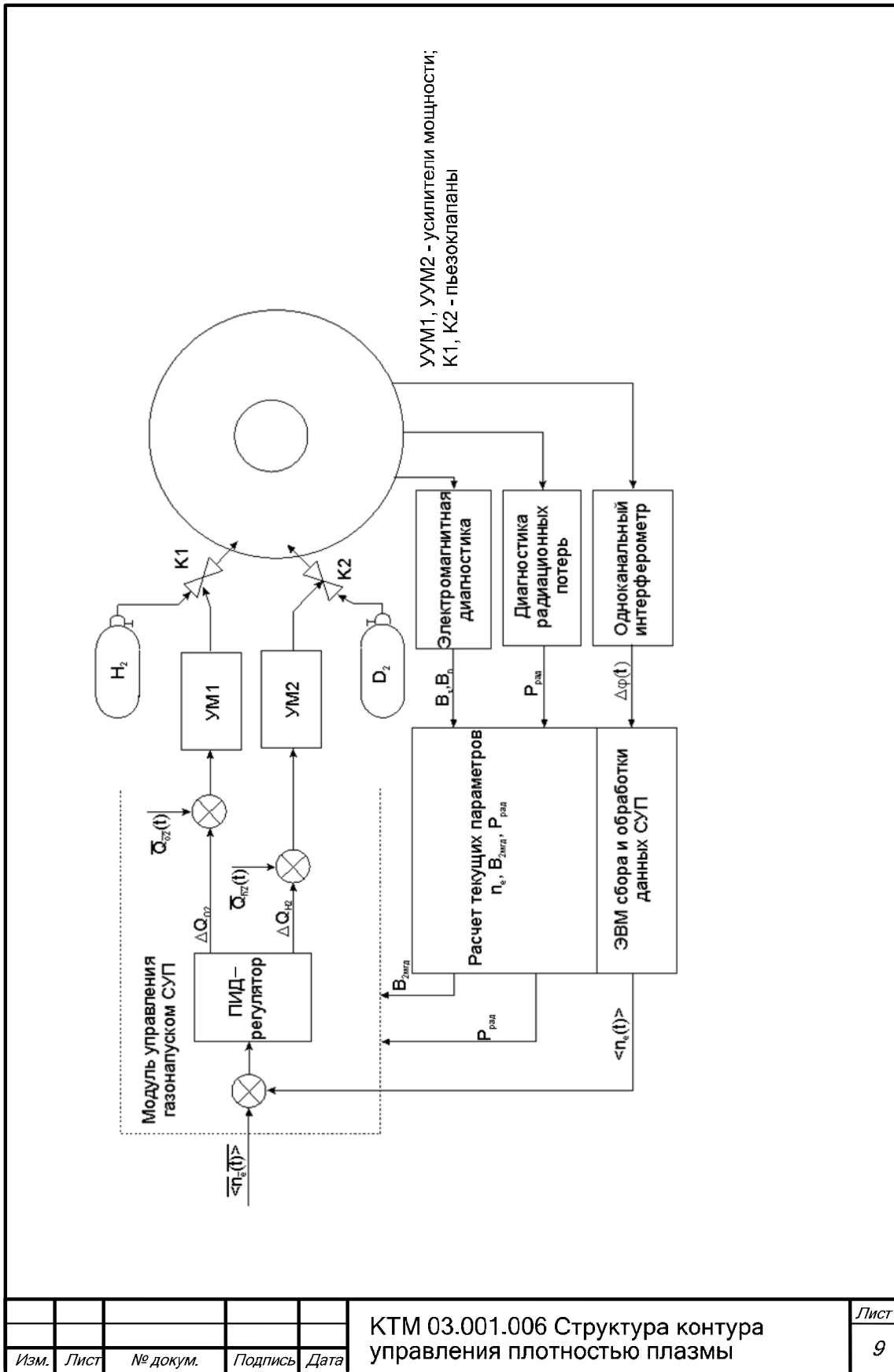




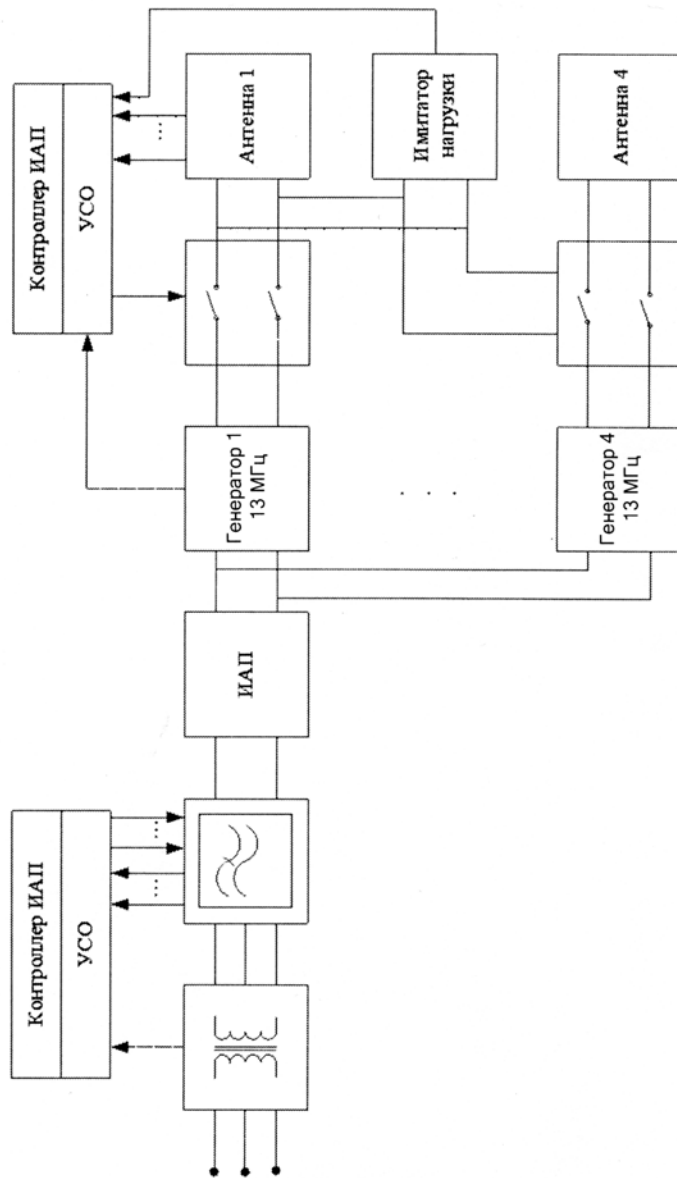




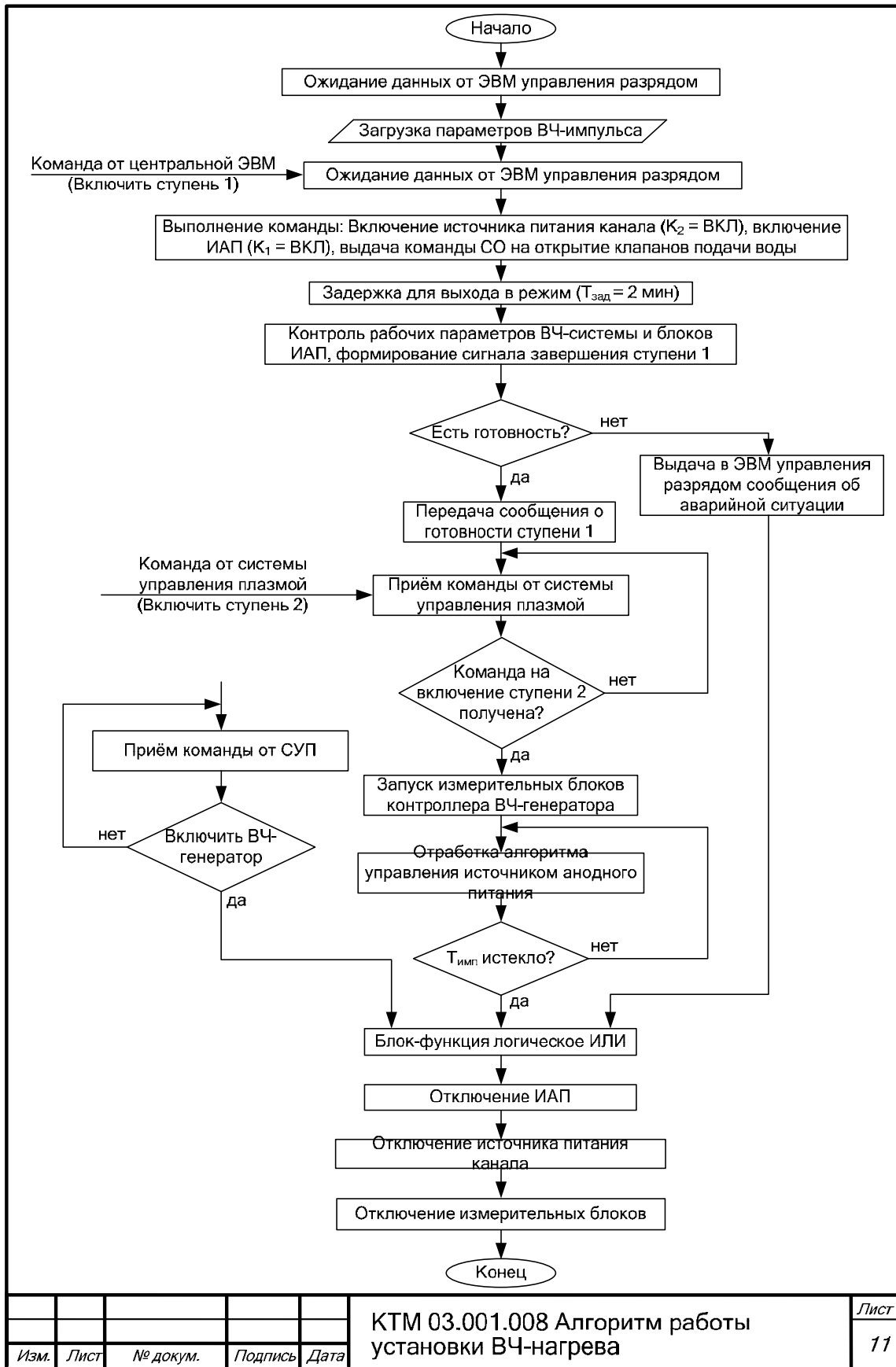
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	КТМ 03.001.005 Структурная схема СУП тока плазмы	Лист
						8



					КТМ 03.001.006 Структура контура управления плотностью плазмы	Лист 9
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		



					КТМ 03.000.007 Функциональная схем установки ВЧ-нагрева плазмы ТОКАМАКа КТМ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		10

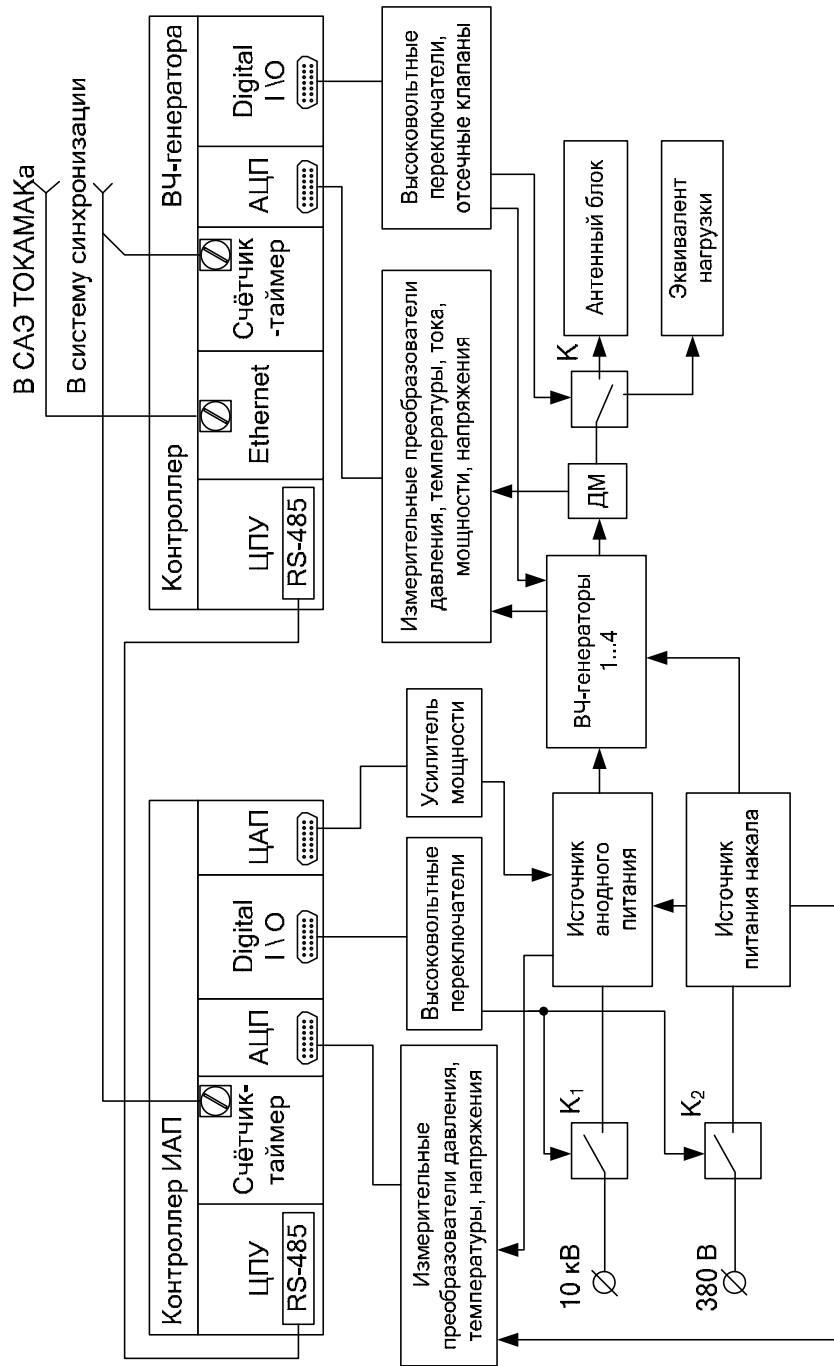


КТМ 03.001.008 Алгоритм работы установки ВЧ-нагрева

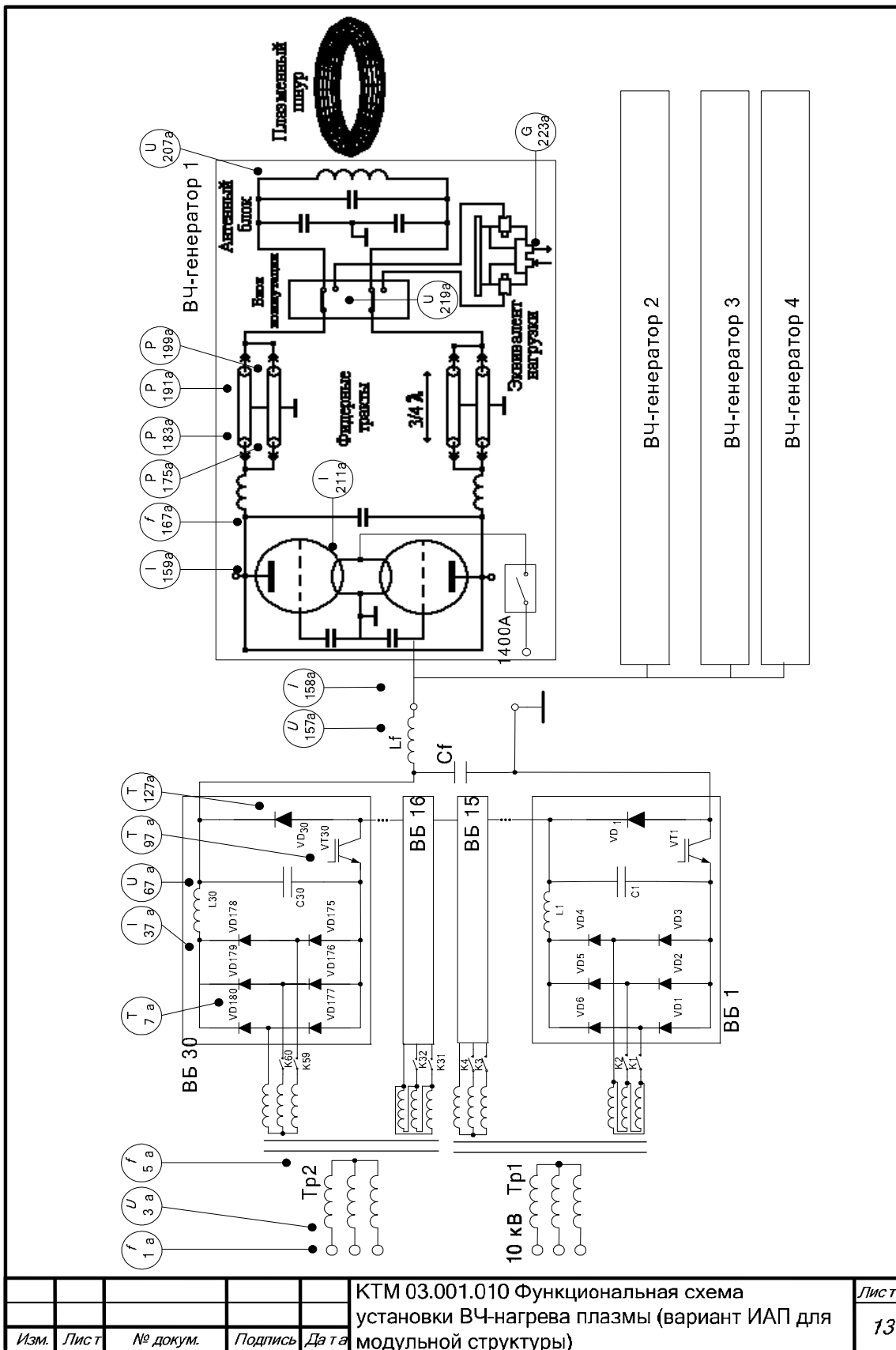
Лист

11

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата



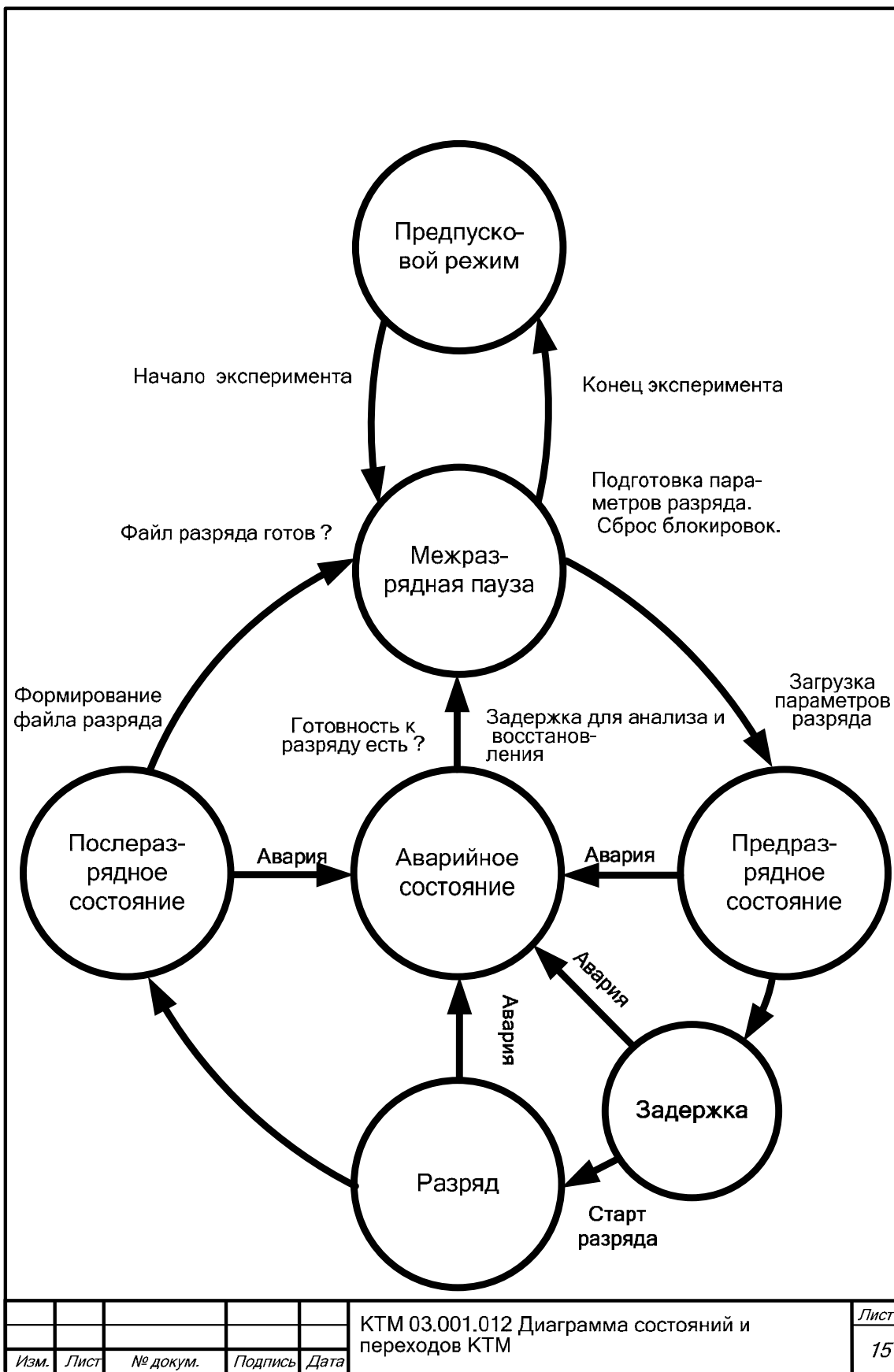
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	КТМ 03.001.009 Структурная схема системы управления установкой ИЦР-нагрева плазмы	Лист
						12



КТМ 03.001.010 Функциональная схема установки ВЧ-нагрева плазмы (вариант ИАП для модульной структуры)

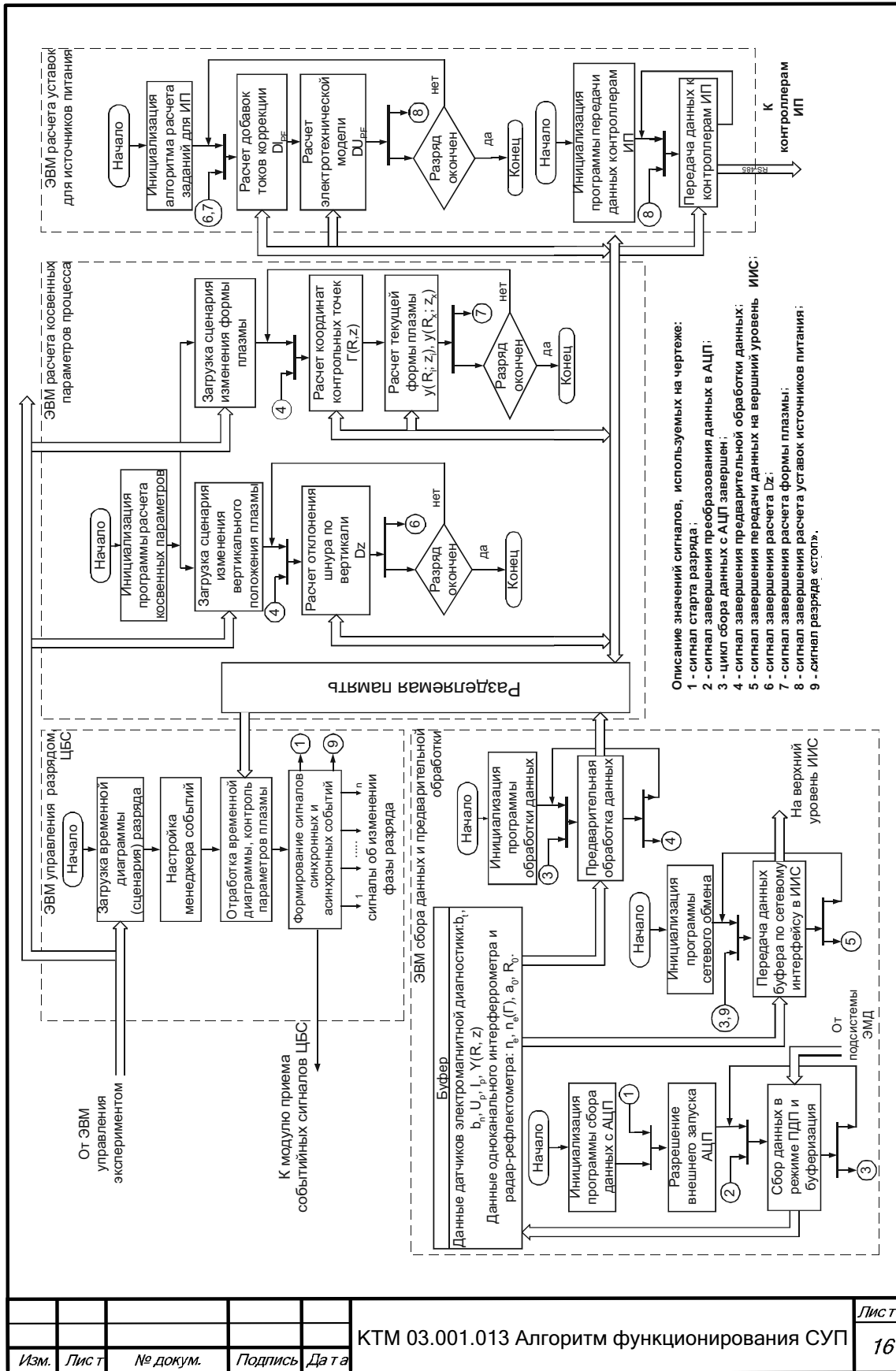
Лист 13

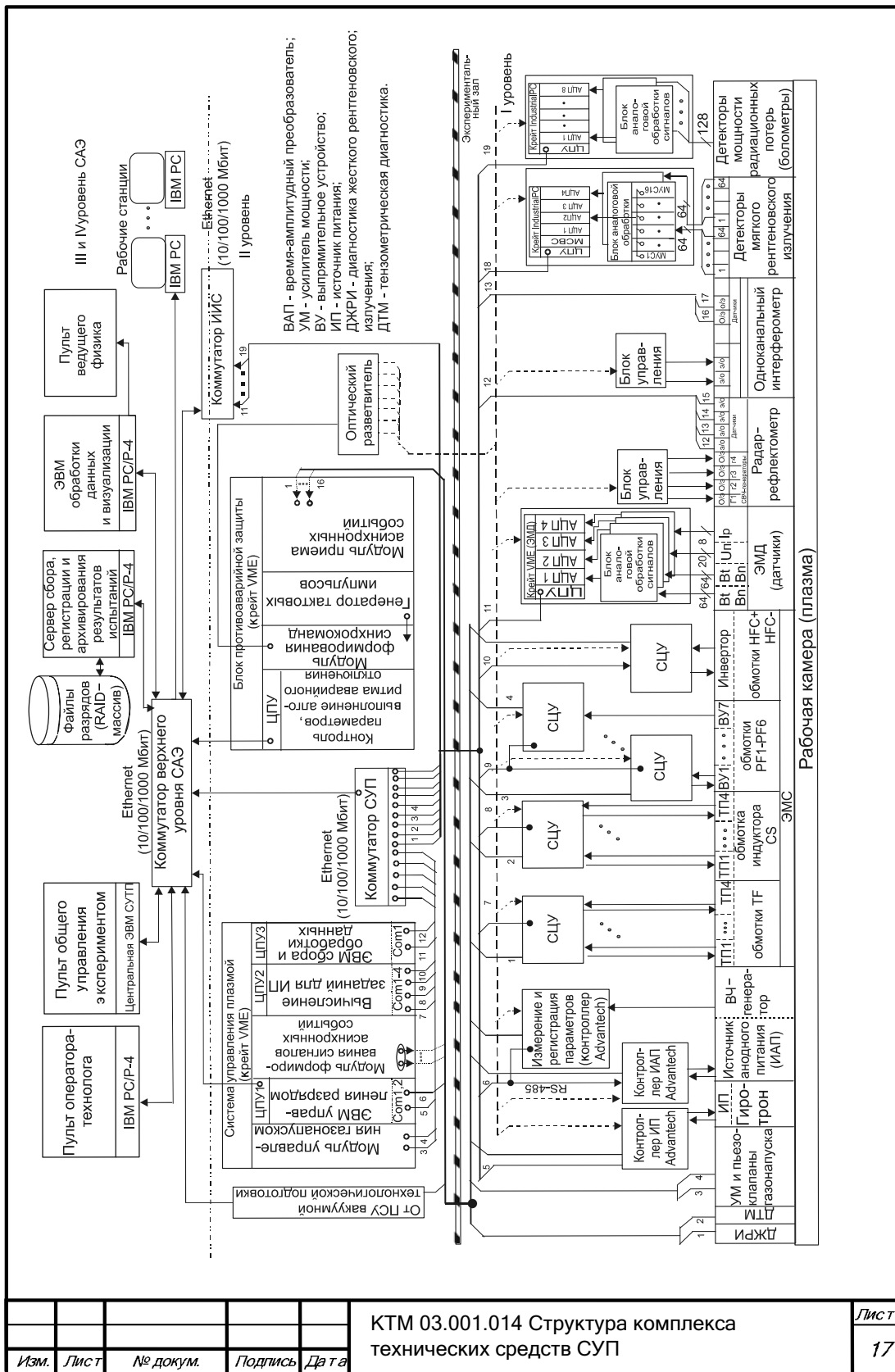




					КТМ 03.001.012 Диаграмма состояний и переходов КТМ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		15



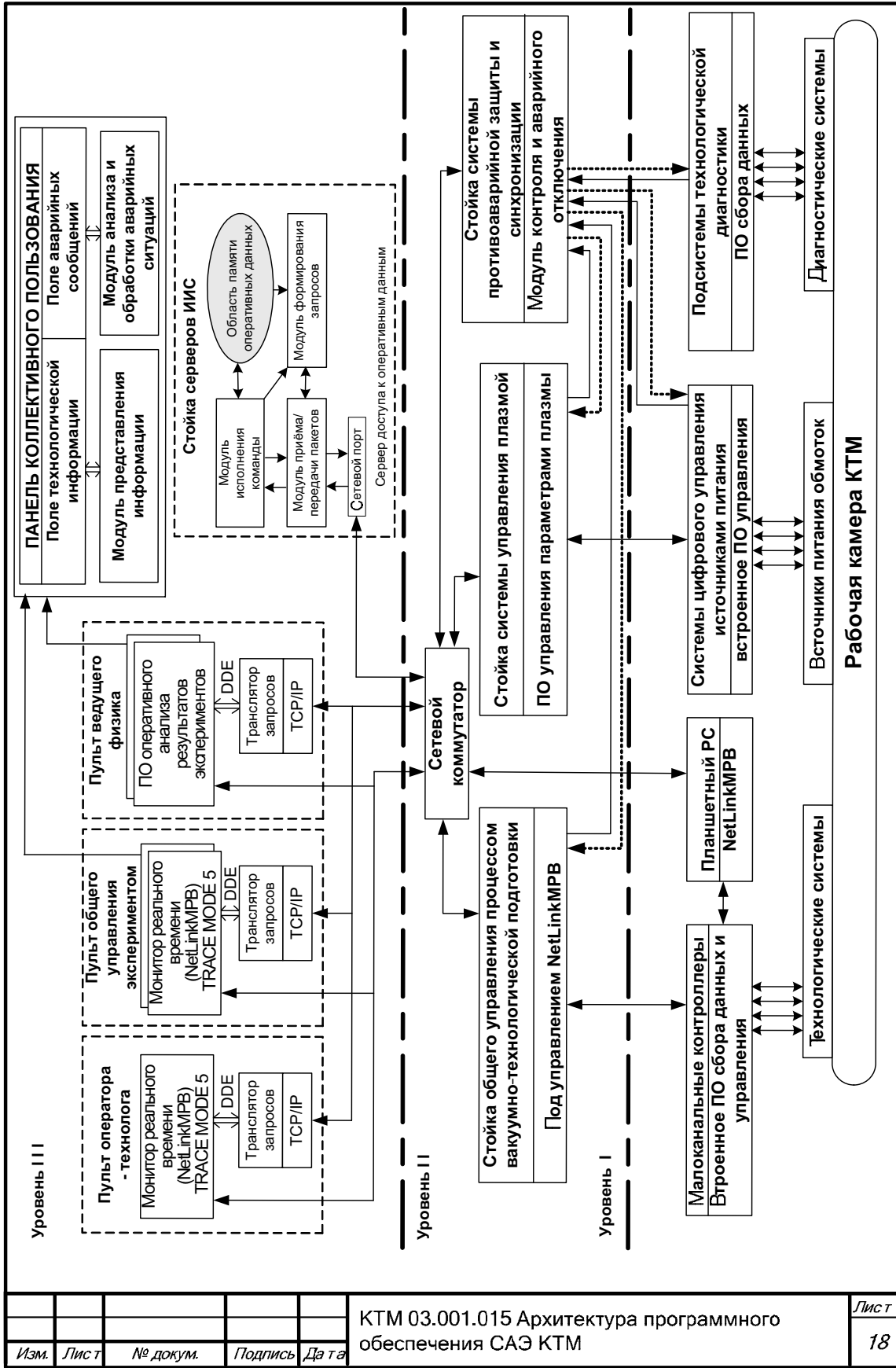




КТМ 03.001.014 Структура комплекса технических средств СУП

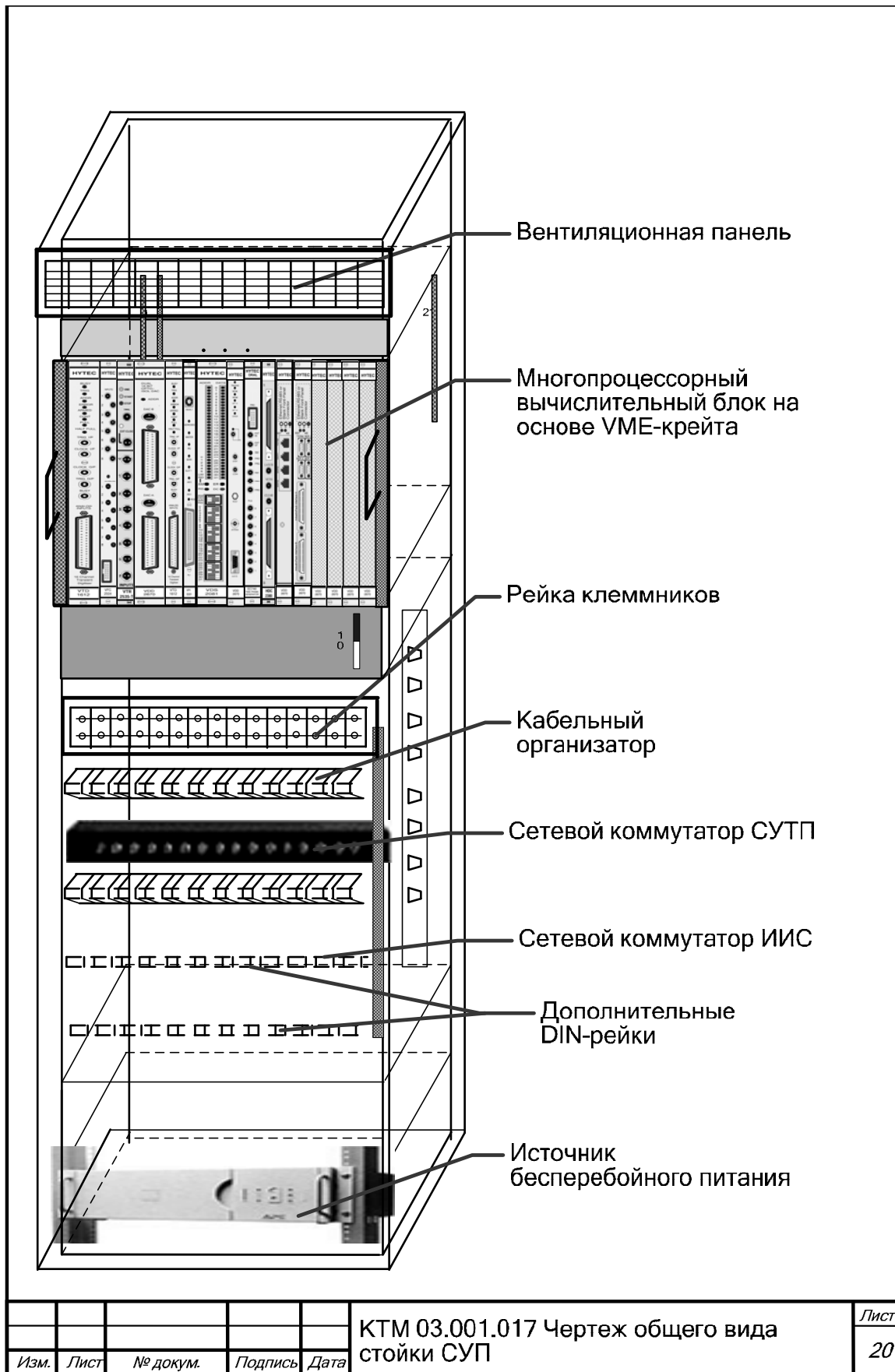
Лист

17

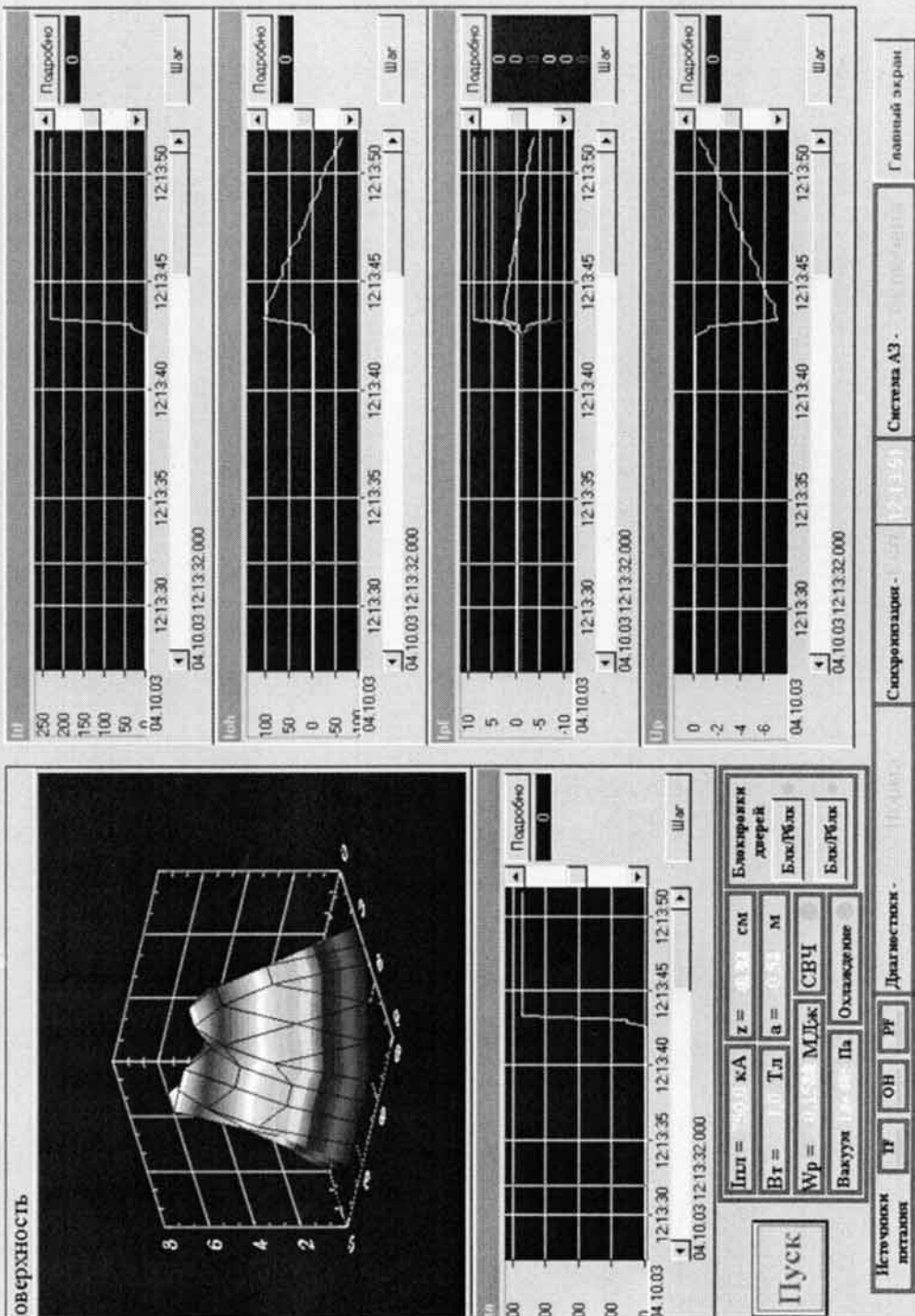


Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	KTM 03.001.015 Архитектура программного обеспечения САЭ КТМ	Лист 18
------	------	----------	---------	------	---	------------





# СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ПЛАЗМОЙ



Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	КТМ 03.001.017 Видеограмма экрана пульта СУП (экран 1)	Лист 21
------	------	----------	---------	------	--	------------



Учебное издание

ПАВЛОВ Вадим Михайлович  
ОБХОДСКИЙ Артём Викторович  
ГОЛОБОКОВ Юрий Николаевич  
ОВЧИННИКОВ Антон Викторович

## СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ПЛАЗМОЙ

Учебное пособие

Научный редактор  
доктор физико-математических наук,  
профессор

*И.В. Шаманин*

Редактор  
Верстка  
Дизайн обложки


*А.В. Высоцкая  
О.Ю. Аршинова  
О.Ю. Аршинова  
О.А. Дмитриев*

Подписано к печати 16.12.2008. Формат 60x84/16. Бумага «Снегурочка».  
Печать XEROX. Усл. печ. л. 8,9. Уч.-изд. л. 8,05.  
Заказ 829. 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.