

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

---

**В.М. Павлов, А.А. Мезенцев  
Е.Ю. Бевзюк, Г.А. Майструк**

## **СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССОМ ПОДГОТОВКИ К ЭКСПЕРИМЕНТУ**

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

Издательство  
Томского политехнического университета  
2008

УДК 53.05(075.8)

ББК 22.3в6я73

П12

**Павлов В.М.**

П12 Система управления процессом подготовки к эксперименту: учебное пособие / В.М. Павлов, А.А. Мезенцев, Е.Ю. Бевзюк, Г.А. Майструк. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2008. – 147 с.

ISBN 5-98298-336-5

Пособие соответствует части рабочей программы дисциплины «Система автоматизации экспериментов на материаловедческой термоядерной установке ТОКАМАК-КТМ» для магистерской программы «Автоматизация технологических процессов и производств», касающейся основных вопросов, связанных с решением задач проектирования функциональных схем системы автоматизации и выбора комплекса технических средств для реализации автоматизируемых функций.

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 очного обучения специальности 140306 «Электроника и автоматика физических установок».

**УДК 53.05(075.8)**

**ББК 22.3в6я73**

*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 5-98298-336-5**

© Павлов В.М., Мезенцев А.А., Бевзюк Е.Ю.,  
Майструк Г.А., 2008

© Томский политехнический университет, 2008

© Оформление. Издательство Томского  
политехнического университета, 2008

## ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	6
1. ПОДСИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ СИСТЕМОЙ ВЫСОКОВАКУУМНОЙ ОТКАЧКИ (ПСУ СВВО).....	7
1.2. Описание функциональной схемы автоматизации системы СВВО .....	8
1.3. Алгоритм работы ПСУ СВВО .....	17
1.4. Разработка эскизов форм отображения информации на пульте оператора-технолога ПСУ СВВО .....	17
2. ПОДСИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССОМ ПОДГОТОВКИ РАБОЧЕЙ КАМЕРЫ.....	21
2.1. Анализ технологического процесса подготовки рабочей камеры ТОКАМАКа КТМ .....	21
2.2. Описание автоматизируемых функций .....	25
2.3. Обобщенный алгоритм подготовки рабочей камеры .....	26
2.4. Автоматизация процесса прогрева рабочей камеры и патрубков КТМ.....	28
2.5. Автоматизация процесса очистки разрядной камеры КТМ .....	34
2.6. Автоматизация процесса боронизации камеры КТМ.....	37
2.7. Описание функциональной схемы автоматизации системы ПРК .....	41
2.8. Структура комплекса технических средств ПСУ системой ПРК .....	43
2.9. Разработка эскизов форм отображения информации на пульте оператора-технолога ПСУ процессом ПРК .....	46
3. ПОДСИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ СИСТЕМОЙ ВОДЯНОГО ОХЛАЖДЕНИЯ (СВО) .....	48
3.1. Описание автоматизируемых функций .....	48
3.2. Описание функциональной схемы автоматизации системы СВО .....	48
3.3. Разработка эскизов форм отображения информации на пульте оператора-технолога ПСУ СВО.....	56
4. ПОДСИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ПОДВИЖНЫМ ДИВЕРТОРНЫМ И ШЛЮЗОВЫМ УСТРОЙСТВАМИ (ПДШУ) .....	59
4.1. Анализ диверторного устройства и шлюзовой камеры как объекта автоматизации.....	59
4.2. Разработка общего алгоритма функционирования подсистемы управления ПДШУ ТОКАМАКа КТМ .....	63
4.2.1. Описание общего алгоритма управления .....	63
4.2.2. Алгоритм операции выгрузки сменного элемента с последующей загрузкой нового элемента .....	65
4.3. Разработка структурной схемы гидравлического привода шлюзовой камеры .....	66
4.3.1. Описание работы исполнительной части гидропривода.....	67
4.3.2. Описание насосной установки, выбор элементов гидропривода .....	68
4.3.3. Состав точек контроля и управления гидроприводом .....	69

4.4. Разработка схемы контроля положения диверторного стола при его перемещении в вертикальном и радиальном направлениях .....	69
4.5. Разработка схемы управления электромеханическими приводами подвижного диверторного устройства (ПДУ) .....	73
4.5.1. Разработка математической модели линейного электромагнитного двигателя. Расчёт силовой характеристики $F(x)$ .....	73
4.5.2. Расчёт параметров обмотки двигателя. Определение требований к управляемым источникам питания (ИП) приводов подъёма/вращения диверторного стола.....	76
4.6. Разработка структурно-функциональной схемы управления подвижным диверторным и шлюзовым устройствами.....	79
4.7. Определение структуры комплекса технических средств (КТС) подсистемы управления ПДШУ .....	84
4.8. Проектирование графического интерфейса пульта оператора для управления и отображения параметров системы ПДШУ.....	88
5. СТРУКТУРА КОМПЛЕКСА ТЕХНИЧЕСКИХ СРЕДСТВ ПОДСИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССОМ ВАКУУМНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ПОДГОТОВКИ РАБОЧЕЙ КАМЕРЫ КТМ.....	92
6. ЗАЩИТА ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ КАНАЛОВ ПОДСИСТЕМЫ ВАКУУМНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ПОДГОТОВКИ ОТ ВОЗДЕЙСТВИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОМЕХ .....	100
7. СТРУКТУРА ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ .....	106
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ.....	110

## СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ

ТОКАМАК [Тороидальная камера и магнитная катушка] – комплекс технических и программных средств, необходимых для получения управляемого термоядерного синтеза.

АОГ – анализатор остаточных газов.

БВО – блоки высоковакуумной откачки.

БФО – блок формирования вакуумной откачки.

ИТПР – источник питания тлеющего разряда.

КТС – комплекс технических средств.

ПДШУ – подвижное диверторное и шлюзовое устройство.

ПРК – подготовка рабочей камеры.

ПСУ – подсистема управления.

РК – рабочая камера.

СВВО – система высоковакуумной откачки.

СВО – система водяного охлаждения.

СУТП – система управления технологическим процессом.

ТМН – турбомолекулярный насос.

УСДУ – устройство сбора данных и управления.

ЦВС – централизованная вакуумная система.

## ВВЕДЕНИЕ

В системе автоматизации термоядерной установки типа ТОКАМАК можно выделить ряд подсистем, имеющих свои ярко выраженные функциональные особенности:

- система управления процессом подготовки к эксперименту;
- система управления плазмой;
- система синхронизации и противоаварийной защиты;
- информационно-измерительная система;
- система цифрового управления источниками питания.

В данном учебном пособии, первом из серии, посвященной автоматизации установок типа ТОКАМАК, рассматриваются подходы, используемые при проектировании систем управления процессом подготовки. Пособие состоит из 7 разделов. Первые четыре раздела содержат анализ ТОКАМАКА и его технологических подсистем:

1. Подсистема управления системой высоковакуумной откачки (ПСУ СВВО).
2. Подсистема управления процессом подготовки рабочей камеры.
3. Подсистема управления системой водяного охлаждения (ПСУ СВО).
4. Подсистема управления подвижным диверторным и шлюзовым устройствами (ПДШУ).

Последние разделы содержат информацию о структуре комплекса технических средств подсистем для автоматизации процесса подготовки установки ТОКАМАК КТМ к экспериментам; о защите измерительных каналов подсистем вакуумно-технологической подготовки от помех; о структуре программного обеспечения.

# 1. ПОДСИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ СИСТЕМОЙ ВЫСОКОВАКУУМНОЙ ОТКАЧКИ (ПСУ СВВО)

## 1.1. Описание автоматизируемых функций

Система откачки рабочей камеры должна обеспечивать откачку рабочей камеры от атмосферного давления и поддержание в ней фонового разряжения до  $10^{-7}$  мм рт. ст. при прогреве стенок камеры до 200 °С. Для получения требуемого фонового давления наряду с процессом откачки должно быть предусмотрено проведение ряда технологических операций (прогрев, тренировка стенки рабочей камеры путем использования тлеющего разряда, боронизация) с целью очистки и обезгаживания стенок камеры, что, в свою очередь, приведет к снижению удельного потока газа при рабочей температуре. Для получения в обезгаженной рабочей камере КТМ фонового давления требуются средства откачки с предельным остаточным давлением менее  $10^{-7}$  мм рт. ст.

При этом система высоковакуумной откачки должна обеспечить выполнение следующих функций:

1. Начальная откачка рабочей камеры объемом 11 м<sup>3</sup>.
2. Вакуумно-технологическая подготовка рабочей камеры.

В этом режиме подсистема управления СВВО, работает совместно с ПСУ системы подготовки рабочей камеры, выполняющей тепловое обезгаживание и тренировку стенок тлеющим разрядом. Газовая нагрузка в этом режиме определяется потоком теплового газа от стенок рабочей камеры.

3. Поддержание требуемых вакуумных параметров в процессе эксперимента.

4. Откачка рабочей камеры в промежутках между импульсами разрядного тока.

В наиболее общем случае вакуумные параметры зависят от типа установки, энергии ионов, времени жизни плазмы, рабочего газа и других факторов, но основные вакуумные условия сводятся к следующему. Необходимо иметь как можно более легкие составляющие газа в вакуумном объеме установки при давлении остаточного газа не выше  $10^{-7}$  мм рт. ст., поскольку молекулы остаточного газа охлаждают горячую плазму за счет перезарядки, а также являются источником мощного тормозного излучения. Потери на излучение горячей плазмы могут быть сравнимы с энергией синтеза. Также следует заметить, что стенки вакуумной камеры

подвержены воздействию токов частиц большой энергии, поэтому они являются мощным источником потоков десорбированных молекул, что накладывает серьезное ограничение на использование средств откачки, особенно тех, которые не могут работать в магнитном поле и загрязняют вакуумный объем. Также немаловажное значение имеет экономичность выбранных средств откачки и обслуживающей ее аппаратуры.

## 1.2. Описание функциональной схемы автоматизации системы СВВО

Вакуумирование рабочей камеры КТМ в диапазоне  $p = 10^{-1} - 10^{-7}$  мм рт. ст. производится 4-мя турбомолекулярными насосами ТМН-1500 через два откачных патрубка  $D_u = 400$  мм. В схеме откачки также используется 5 форвакуумных насосов. Для обеспечения требуемых параметров по вакууму в шлюзовом устройстве требуется дополнительный турбомолекулярный насос. Турбомолекулярные насосы располагаются вблизи ТОКАМАКа и соединяются с рабочей камерой через соответствующие патрубки. Форвакуумные насосы располагаются в отдельном помещении. Система высоковакуумной откачки соединяется с насосами форвакуумной откачки камеры вакуумопроводами, укомплектованными шиберами, вентилями и клапанами. В целом предполагаемая схема системы высоковакуумной откачки приведена на рис. 1.1.

Для перекрытия патрубков с  $D_u = 400$  мм обычно устанавливают высоковакуумные затворы (затворы с электромеханическим приводом, плоские), предназначенные для герметичного перекрытия высоковакуумных систем в диапазоне давлений  $p = 10^5 - 10^{-7}$  Па. Время срабатывания такого затвора 7 с. В крайних положениях привод затвора автоматически отключается сдвоенными конечными выключателями, один из которых подает унифицированный сигнал на управляющее устройство. Для этих затворов допустимый поток натекания в вакуумную полость затвора не более  $1,33 \cdot 10^{-10}$  Па·м<sup>3</sup>/с. Питание таких затворов осуществляется от сети постоянного тока 24–127 В и 220–380 В переменного тока. Средний ресурс 120000 циклов. Также возможно применение специальных средств фильтрации, монтируемых непосредственно в высоковакуумном затворе. Для аварийного перекрытия высоковакуумных линий откачки после каждого турбомолекулярного насоса следует установить отсечной электромагнитный клапан. Это объясняется быстродействием срабатывания такого клапана 1с и возможностью его установки на вакуумопровод, имеющий сечение <120 мм. В случае отказа питания такой отсечной клапан автоматически закрывается, что в свою очередь не



позволит разгерметизировать разрядную камеру. Нарботка на отказ таких клапанов не менее 100000 циклов.

Форвакуумный тракт представляет собой 5 форвакуумных насосов типа АВЗ-63Д. Управление этими насосами заключается в ведении их в работу (включении) и отключении. В отличие от форвакуумных насосов турбомолекулярные насосы приводятся от электродвигателя через мультипликатор либо от высокочастотного электродвигателя и требуют вывода их в номинальный режим работы по определенной траектории (закону). В настоящее время турбомолекулярные насосы, как правило, включают в свой состав микропроцессорную систему управления. Так турбомолекулярные насосы серии ICE производства фирмы Varian Vacuum Technologies содержат блок управления, полностью контролирующего работу насоса. Блок управления Turbo-V ICE содержит микропроцессорный преобразователь частоты, надежно защищенный от внешних воздействий (удары, электрические разряды и т. д.), соединительные кабели также имеют усиленную конструкцию и тщательную экранировку. Встроенные средства самодиагностики и защиты обеспечивают надежную работу в присутствии рядом высоковольтного оборудования. Во время работы насоса блок управления непрерывно контролирует скорость, ток, потребляемую мощность и температуру подшипников. Блок управления может управляться и программироваться от удаленного устройства (компьютер, контроллер и т.п.) через интерфейсы RS-232, RS-422 и RS-485 (например, для выбора 2-х независимых скоростей вращения).

Для предотвращения миграции паров масла с форвакуумных насосов в высоковакуумный тракт системы откачки необходимо предусмотреть дублирование цеолитовых ловушек, расположенных в непосредственной близости с форвакуумными насосами. Каждая линия форвакуумного тракта, включая форвакуумный насос, оснащается клапанами. В связи с тем, что цеолитовые ловушки и форвакуумные насосы располагаются в одном помещении и находятся постоянно в работе, то в состав запорной арматуры форвакуумных линий должны входить вакуумные клапаны с электромеханическими и ручными приводами. В виду этого предлагается использовать клапаны ВК1-ВК12 – с электромеханическим и с ручным приводом, и клапаны К1-К12 – только с ручным приводом. Такое построение форвакуумной системы позволит менять вышедшие из строя цеолитовые ловушки и форвакуумные насосы, не останавливая процесс откачки.

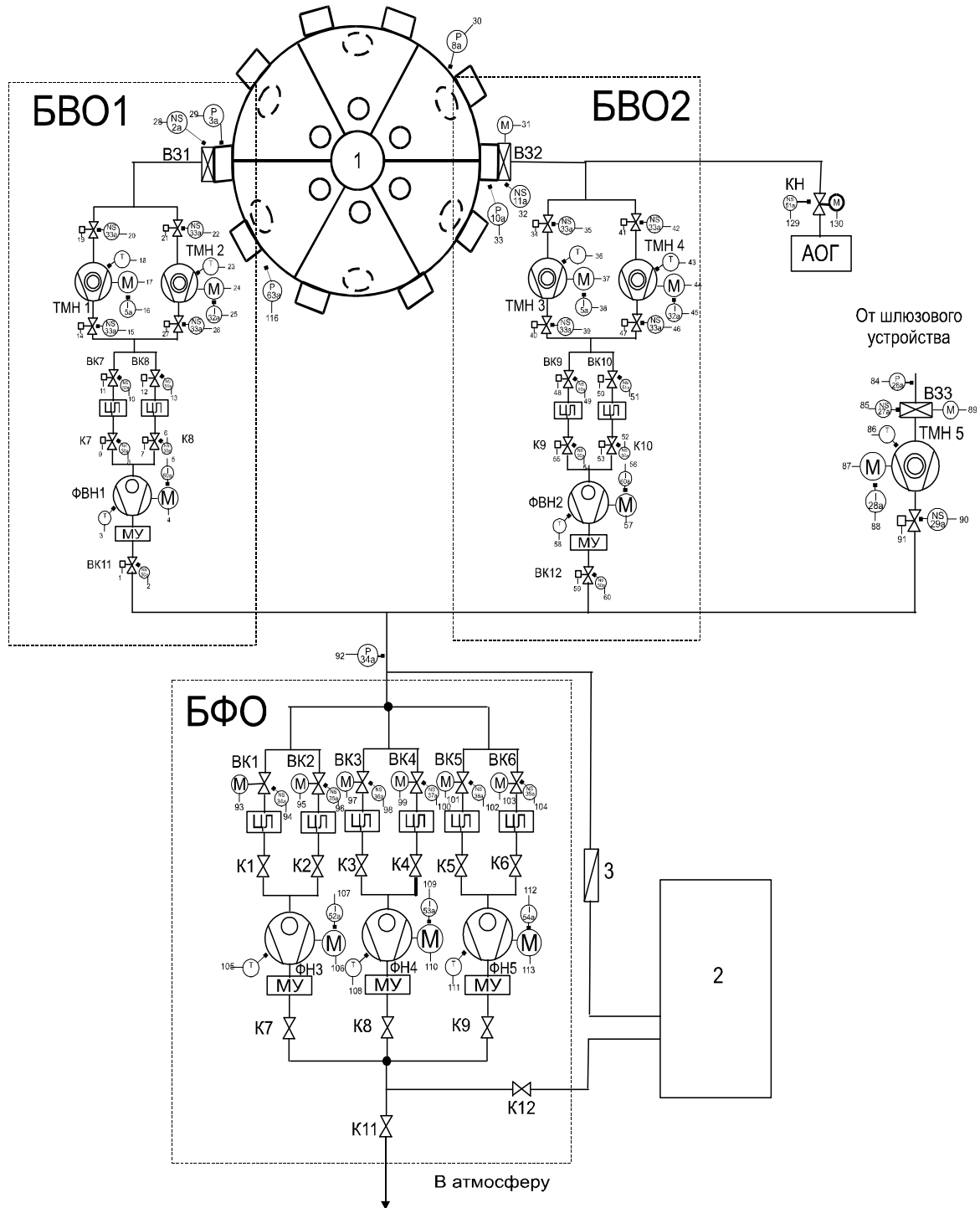


Рис. 1.1. Система высоковакуумной откачки

1 – тороидальная камера; 2 – очистка вредных примесей; 3 – предохранительная мембрана, В31–В33 – высоковакуумные затворы с электромеханическим приводом; ВК1–ВК6 – вакуумные клапаны с электромеханическим и ручным приводом; К1–К11 – вакуумные клапаны с ручным приводом; КН – клапан-натекатель; АОГ – анализатор остаточного газа

Для измерения давления в разрядной камере КТМ и в системе высоковакуумной системы откачки во всем диапазоне его возможного изменения – от атмосферного и до глубокого вакуума ( $10^{-7}$  мм рт. ст.), – исходя из современных достижений в области методов и средств измерения вакуума в широком диапазоне, можно рекомендовать использование:

1. Датчик форвакуума конвекционного типа Convectorr с диапазоном измерения  $1 \cdot 10^{-3}$ –1000 торр. Этот датчик хорошо подходит для наблюдения за процессом откачки вакуумных камер от атмосферы до заданного вакуума и определения момента включения турбомолекулярных насосов.

2. Для измерения высокого вакуума можно использовать ионизационный датчик стандартного диапазона типа Bayard-Alpert серии 563, имеющий защиту от перегорания нити накала. Диапазон измерения от  $2 \cdot 10^{-10}$  торр до  $1 \cdot 10^{-3}$  торр.

Оба типа вакуумных датчиков управляются при помощи программируемого контроллера senTorr (модель CC2c). Производитель – Varian Vacuum Technologies. Контроллер легко программируется с клавиатуры, расположенной на передней панели, и дистанционно от ЭВМ через интерфейсные порты RS-232 или RS-485. Команды контроллера позволяют измерять парциальное давление требуемого газа, автоматически включать и отключать ионный датчик. В дополнение к этому пользователь может выбрать единицу измерения (торр или мбар), скорость передачи сигнала, чувствительность, ток эмиссии. Контроллер имеет режим ожидания, в котором исключается подача питания на все элементы, кроме главного микропроцессора. Другие установки, например, калибровка, частота обновления информации, защита от падения напряжения – легко настраиваются с передней панели. Для увеличения точности измерения давления возможна регулировка чувствительности с целью ее соответствия техническим характеристикам датчика. Регулировка тока эмиссии позволяет пользователю увеличить диапазон измерения и/или продлить срок эксплуатации трубки. Панель управления имеет блокировку, позволяющую предохранить выставленные настройки от случайного их изменения. Аналоговый сигнал от каждого датчика доступен на задней панели контроллера.

Одним из важных элементов подсистемы управления СВВО является анализатор остаточных газов (АОГ). Система анализа остаточных газов должна обеспечивать получение информации о давлении разреженного газа в рабочей камере и его парциальном составе и определение количества примесных газов, выделившихся в процессе выполнения подготовительных процедур, таких как прогрев, очистка

тлеющим разрядом и боронизация, проводящаяся для защиты внутренней поверхности камеры от воздействия интенсивных корпускулярных и электромагнитных потоков. Информация, получаемая с АОГ, также может использоваться для анализа вакуумной целостности камеры (течеискание).

Из проведенного анализа методов исследования остаточных газов следует, что одним из наиболее приемлемых вариантов является масс-спектрометрический метод. Анализатор такого типа располагается в экспериментальном зале и сопрягается с ЭВМ второго уровня СУТП при помощи цифровой линии связи. Масс-спектрометр также может быть использован и для исследовательских целей при изучении процессов взаимодействия плазма-стенка и водородно-дейтериевого обмена. Исходя из анализа состава возможных соединений в рабочей камере КТМ установлено, что диапазон анализируемых масс должен составлять до 200 а.е.м. Масс-спектрометрическая установка представляет собой вакуумную камеру, откачную систему, систему ионизации и ускорения ионов, камеру разделения, детектор, схему измерения и вычислительную часть. Пробы газа заводятся непосредственно через отдельный вакуумный канал и дозируются с помощью клапана-натекателя. В качестве варианта для построения АОГ предполагается использование масс-спектрометра МХ-7304А (ОАО Selmi, г. Сумы, Украина). Выходной сигнал – цифровой (интерфейс RS-232). В приборе предусмотрена аварийная защита катодов, вторичного электронного умножителя, переключение ионизирующего напряжения и тока эмиссии, внутренняя диагностика и т. д.

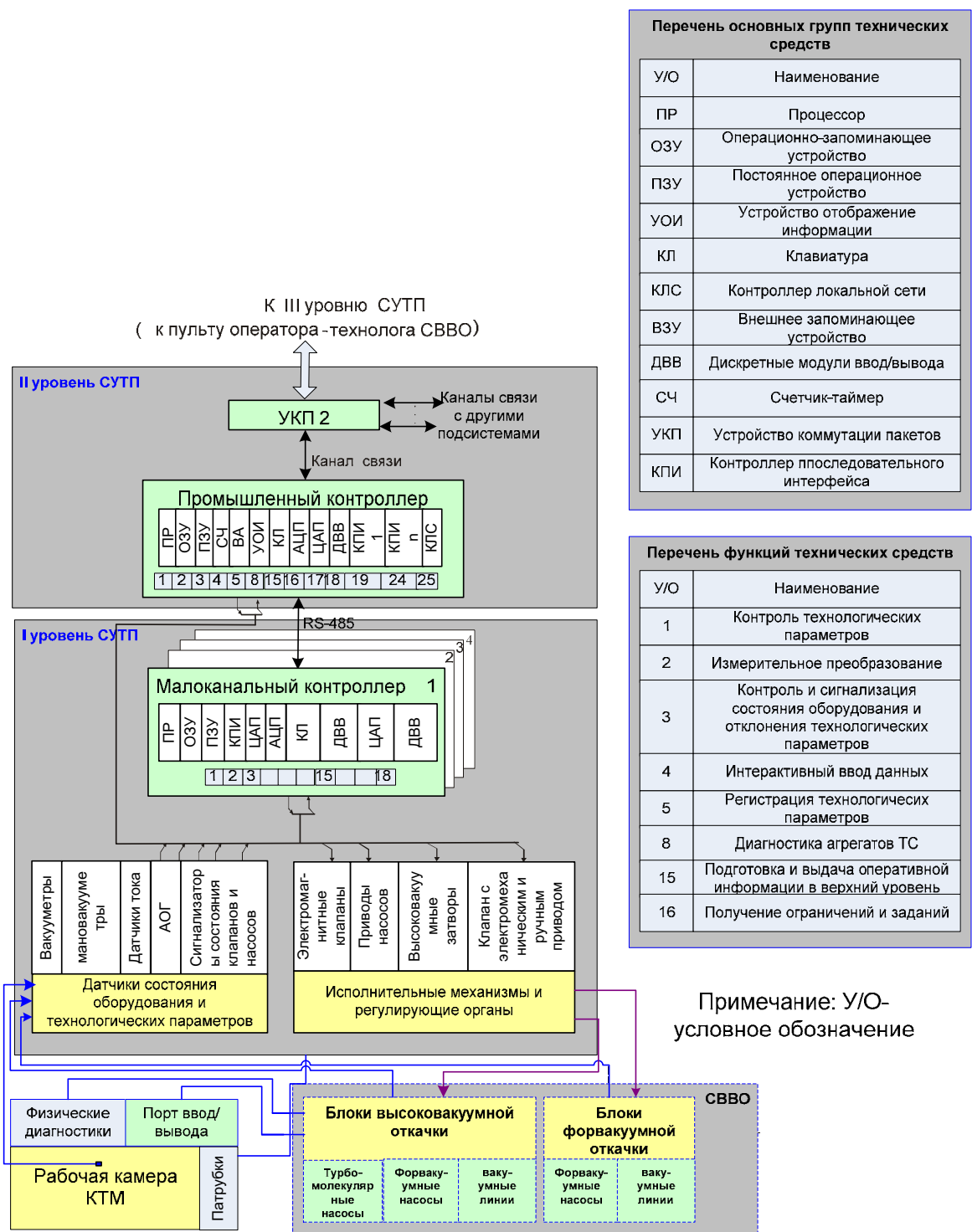
При эксплуатации турбомолекулярных насосов, особенно при остановке и последующем пуске, для обеспечения чистоты вакуума необходимо соблюдать некоторые меры, заключающиеся в предотвращении проникновения паров углеводородов через остановленный насос в откачиваемую камеру. Наряду с этим при решении вопросов автоматизации должно быть обеспечено выполнение разных режимов закрытия и открытия высоковакуумных затворов. Закрытие их должно осуществляться с максимальной скоростью, а открытие при работающих турбомолекулярных насосах для откачки из камеры в промежутках между импульсами – со скоростью, обеспечивающей оптимальную нагрузку на валах двигателей приводов этих насосов. Контроль нагрузочных моментов на валах электродвигателей приводов насосов может быть произведен по току якоря. Очевидно, что такой контроль необходимо осуществлять для электродвигателей всех типов насосов, используемых на КТМ. Помимо рассмотренного, для обеспечения нормальной работы системы высоковакуумной откачки должен быть обеспечен необходи-

мый тепловой режим работы ее насосов. Последнее рационально обеспечить с помощью отдельной системы водяного охлаждения.

Вакуумные средства должны также иметь сравнительно большой ресурс бесперебойной и надежной работы в течение всего времени эксплуатации термоядерной установки. Требования высокой надежности всех систем термоядерной установки обусловлены, в частности, сложностью ремонта и замены вышедших из строя элементов вследствие затрудненного доступа к ним и возможностью повышения радиации в экспериментальном зале. При работе КТМ наиболее вероятны две группы аварий вакуумной системы: разгерметизация рабочей камеры и выход из строя какого-либо элемента системы откачки. Нарушение герметичности камеры может привести к увеличению содержания примесей в плазме и явиться причиной выброса газов в экспериментальный зал. Отказ же высоковакуумного насоса или вакуумного затвора приведет к снижению скорости откачки разрядной камеры. В большинстве вакуумных систем для перекрытия трубопроводов в случае аварий (обесточивание систем, выход из строя вспомогательного насоса, внезапное натекание) чаще всего применяют электромагнитные клапаны. Система аварийного закрытия обычно включает манометрический преобразователь, блокировочный вакуумметр и исполнительный элемент – клапан. Время срабатывания такой системы в лучшем случае составляет 1 с. Так как клапаны с большим Ду должны иметь магнит со значительным числом ампер-витков, и, следовательно, с большой индуктивностью, основной вклад во время срабатывания системы вносит сам клапан. Малое время срабатывания и высокая надежность устройства для аварийного перекрытия трубопроводов приобретают особую важность при использовании этих устройств в централизованных вакуумных системах (ЦВС), так как несрабатывание аварийного устройства приводит к выходу из строя всей ЦВС с подключенными к ней установками.

Из всего вышеперечисленного вытекает, что для обеспечения эффективной и надежной работы системы высоковакуумной откачки, необходимо создание специализированной автоматизированной системы управления процессом откачки. В виду того, что элементы контроля и управления разнесены в пространстве, автоматизированную систему управления процессом откачки целесообразно строить на базе малоканальных контроллеров и промышленного компьютера. Структурная схема предлагаемой подсистемы управления СВВО представлена на рис. 1.2.

Как следует из рассмотрения этой схемы, первый уровень подсистемы управления системой высоковакуумной откачки включает в себя датчики состояния оборудования и технологических параметров, исполнительные механизмы и малоканальные контроллеры. Перечень точек контроля и управления СВВО показан в табл. 1.1.



**Перечень основных групп технических средств**

У/О	Наименование
ПР	Процессор
ОЗУ	Операционно-запоминающее устройство
ПЗУ	Постоянное операционное устройство
УОИ	Устройство отображение информации
КЛ	Клавиатура
КЛС	Контроллер локальной сети
ВЗУ	Внешнее запоминающее устройство
ДВВ	Дискретные модули ввод/вывода
СЧ	Счетчик-таймер
УКП	Устройство коммутации пакетов
КПИ	Контроллер последовательного интерфейса

**Перечень функций технических средств**

У/О	Наименование
1	Контроль технологических параметров
2	Измерительное преобразование
3	Контроль и сигнализация состояния оборудования и отклонения технологических параметров
4	Интерактивный ввод данных
5	Регистрация технологических параметров
8	Диагностика агрегатов ТС
15	Подготовка и выдача оперативной информации в верхний уровень
16	Получение ограничений и заданий

Примечание: У/О-условное обозначение

Рис. 1.2. Структурная схема подсистемы управления системой высоковакуумной откачки (СВВО) КТМ:  
 СВВО – система высоковакуумной откачки; ВЛ – вакуумные линии;  
 ЭЗ – экспериментальный зал

Таблица 1.1

## Перечень точек контроля и управления СВВО

Первичные преобразователи							
№ п/п	Наименование изм. параметра	Блок СВВО	Кол-во	Первичн. Преобр.	Диап. изм.	Вых. сигн.	Примеч.
1	Разряжение	Блоки высоковакуумной откачки (БВО)	2	Convectorr	$10^{-3}$ –1000 торр	0–10 В или цифровой интерфейс	Датчики управляются от контроллера senTorr или Multi-Gauge
			2	Bayard-Alpert	$10^{-3}$ – $10^{-10}$ торр	0–10 В или цифровой интерфейс	
		Шлюзовое устройство	1	Convectorr	$10^{-3}$ –1000 торр	0–10 В или цифровой интерфейс	
			1	Bayard-Alpert	$10^{-3}$ – $10^{-10}$ торр	0–10 В или цифровой интерфейс	
		Блок форвакуумной откачки (БФО)	2	Convectorr	$10^{-3}$ –1000 торр	0–10 В или цифровой интерфейс	
2	Анализ остаточных газов	БВО № 1, 2	1	Масс-спектрометр МХ-7304А	1–200 а.е.м.	цифровой интерфейс	
3	Температура	БВО № 1, 2	5	ТЭП (ХК/ХА)	20–400 С	0–40 мВ	Контроллер турбомолекулярных насосов TurboV
		БФО	5	ТЭП (ХК/ХА)	20–400 С	0–40 мВ	Форвак. насосы
4	Состояние	БВО № 1, 2	25	«Сухой контакт»		24 В	Затворы/клап., двиг. насосов
		БФО	15	«Сухой контакт»		24 В	Клапаны, двиг. форвак. насосов
		<b>ВСЕГО</b>	<b>59</b>				

<b>Исполнительные механизмы</b>							
№ п/п	Род техн. Оборуд.	Блок СВВО	Кол-во	Тип агрегата	Режим управления	Примечание	
5	Высоковак. затв.	БВО № 1, 2	2	ЗПТ-25	Откр/Закр		
			4	ЗМКИ	Откр/Закр		
	Клапаны(магн)			4	КВМ-63	Откр/Закр	
				4	КВЭ-63	Откр/Закр	
	Клапаны(эл.мех.)			7	КВЭ-63	Откр/Закр	
				1	ЗПТ-25	Откр/Закр	
	Высоковак.затв.	Порт		1	ЗПТ-25	Откр/Закр	
				1	КВМ-63	Откр/Закр	
				3	ЗМКИ	Откр/Закр	
	6	Насосы	БВО № 1, 2	3	КВЭ-63	Откр/Закр	
4				ТМН-1500	Лог.прогр.упр.		
2				АВЗ-63Д	Вкл/Выкл		
		БФО	3	АВЗ-63Д	Вкл/Выкл		
			1				
			Шлюзовое устройство				
		<b>ВСЕГО</b>	<b>39</b>				

В связи с тем, что большее количество измерительных преобразователей, измерительных каналов и исполнительных механизмов располагается в экспериментальном зале, необходимо учесть влияние на их работу электромагнитных полей и других факторов, которые искажают показания датчиков и наводят паразитные токи в измерительных цепях и цепях исполнительных механизмов. Поэтому во всей коммутационной аппаратуре необходимо применять защитные экраны, а также гальваническое разделение по измерительным и управляющим цепям. Наряду с этим сигналы с измерительных преобразователей должны быть унифицированы. Основная часть оборудования ПСУ СВВО, размещаемая в экспериментальном зале (высоковакуумные насосы и датчики), укомплектована средствами микропроцессорной и вычислительной техники (специализированными контроллерами). Специализированные контроллеры, в частности, производимые Varian Vacuum Technologies, имеют усиленную конструкцию, защищены от электромагнитного излучения, электрических разрядов, пробоев. Управление форвакуумными трактами и насосами предполагается реализовать на основе контроллера ADAM-5000.

Эти контроллеры обеспечивают выдачу сигналов на включение и выключение насосов, а также сигналов на управление запорно-управляющей



арматурой. Контроллеры ADAM-5000 располагаются в помещении форвакуумной откачки.

Все контроллеры ПСУ СВВО подключаются радиальными цепями к промышленному компьютеру посредством интерфейса RS-485 со скоростью передачи информации до 115,2 Кбод. В качестве управляющей ЭВМ II уровня подсистемы управления можно использовать промышленный компьютер типа IPC-6010 фирмы Advantech, позволяющий производить подготовку и выдачу оперативной информации на III уровень системы, супервизорное управление технологическим оборудованием и т. д.

### **1.3. Алгоритм работы ПСУ СВВО**

Алгоритм работы ПСУ СВВО в процессе вакуумно-технологической подготовки представлен на рис. 1.3. В начале процесса вакуумирования происходит чтение данных из файла с программой вакуумно-технологической подготовки рабочей камеры и запрос готовности систем, задействованных в данной операции. По сигналам готовности происходит переход непосредственно к операциям прогрева, форвакуумной и высоковакуумной откачки газов. В процессе достижения высокого вакуума ПСУ СВВО в качестве основной информации использует данные о составе остаточных газов в камере КТМ.

Работа всей централизованной системы высоковакуумной откачки должна осуществляться по четко установленной циклограмме. После проведения подготовительных технологических операций должна производиться полная откачка всех газов и адсорбентов из вакуумной камеры. Сначала при помощи форвакуумных насосов достигается условие форвакуума  $10^{-1}$ – $10^{-2}$  мм рт. ст. В этом режиме откачка осуществляется через все вакуумные линии. При достижении условия форвакуума по определенной программе вводятся в работу турбомолекулярные насосы. Далее при достижении высокого вакуума  $10^{-7}$  мм рт. ст. высоковакуумные затворы закрываются, герметизируя при этом рабочую камеру, а турбомолекулярные и форвакуумные насосы остаются в рабочем состоянии.

### **1.4. Разработка эскизов форм отображения информации на пульте оператора-технолога ПСУ СВВО**

Пользовательский интерфейс операторской станции системы высоковакуумной откачки содержит условные обозначения основных узлов данной системы (форвакуумные тракты, насосы, запорно-управляющая арматура).

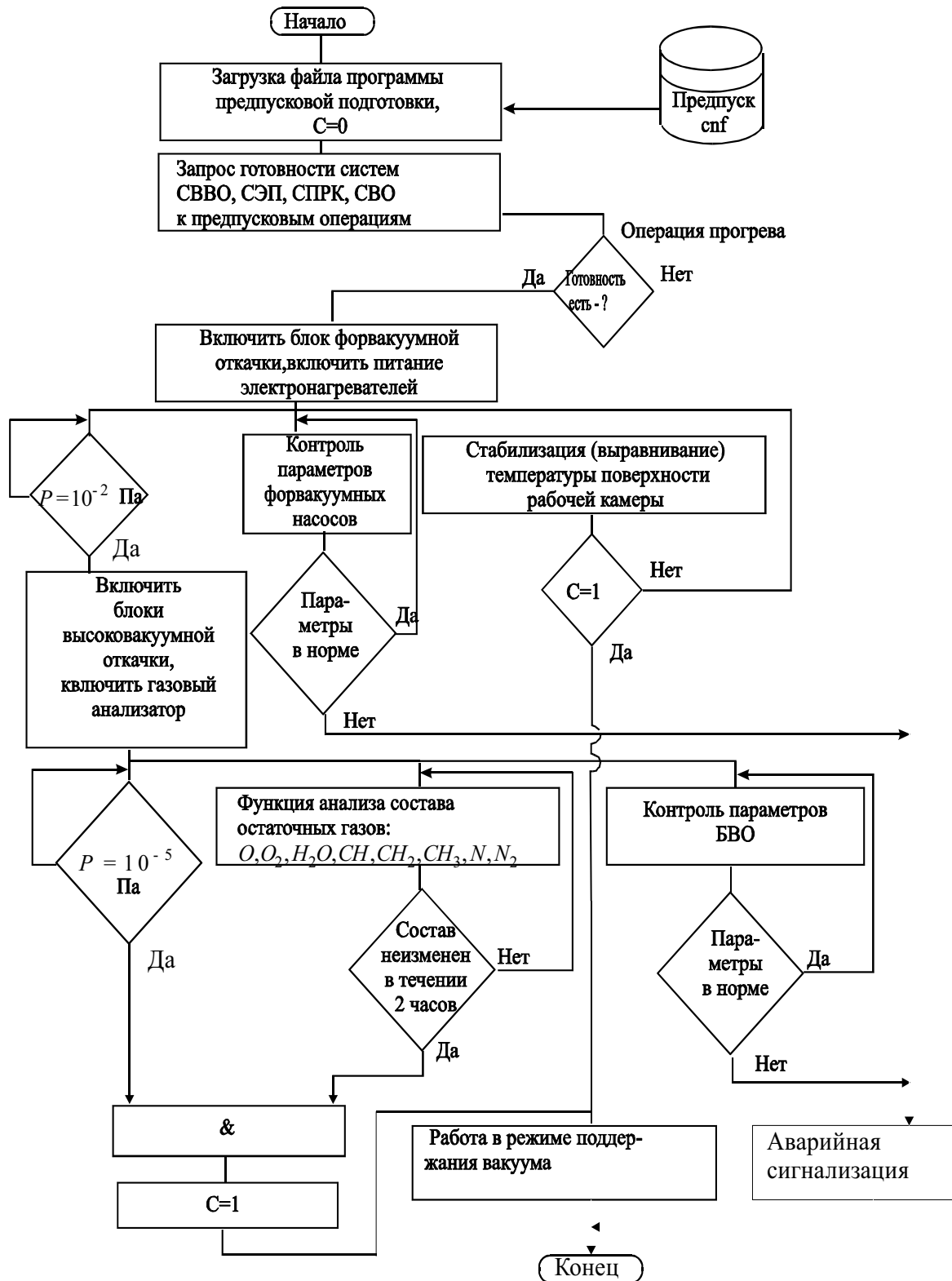


Рис. 1.3. Алгоритм работы ПСУ СВВО

# Система высоко-вакуумной откачки

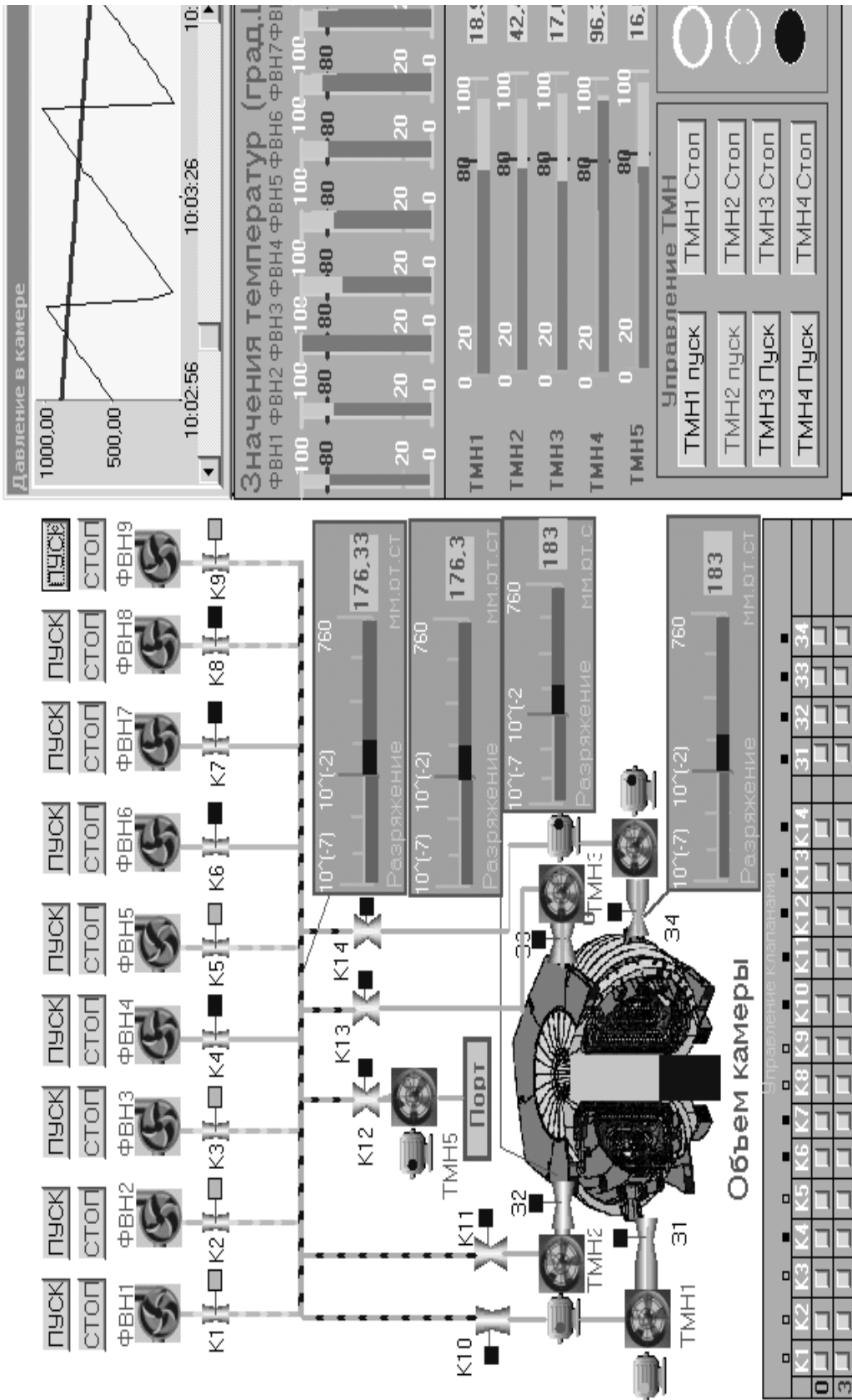


Рис. 1.4. Подсистема управления процессом подготовки рабочей камеры

Графическая мнемосхема кроме статических элементов содержит динамические формы представления основных технологических параметров системы (см. рис. 1.4). Данный интерфейс хорошо отражает процесс высоковакуумной откачки благодаря использованию цветных индикаторов, определяющих состояние клапанов, анимационных объектов, отражающих поведение насосов системы. Управление исполнительными механизмами производится нажатием соответствующих клавиш. Так для включения/выключения форвакуумных насосов используются графические клавиши «ПУСК»/«СТОП», для включения/выключения турбомолекулярных насосов – клавиши «ТМН ПУСК»/«ТМН СТОП». Для управления клапанами и затворами системы откачки используется панель управления клапанами. Состояние всех насосов, клапанов и затворов индицируется соответствующими цветовыми индикаторами.

## 2. ПОДСИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССОМ ПОДГОТОВКИ РАБОЧЕЙ КАМЕРЫ

### 2.1. Анализ технологического процесса подготовки рабочей камеры ТОКАМАКа КТМ

Система подготовки рабочей камеры (ПРК) ТОКАМАКа КТМ предназначена для прогрева патрубков и рабочей камеры до 200 °С, очистки её внутренней поверхности и боронизации. В состав системы ПРК входят:

- ленточные нагреватели с релейными элементами в цепи питания;
- система очистки поверхности камеры тлеющим разрядом;
- устройство боронизации.

Технологическая схема системы ПРК показана на рис. 2.1.

Начальная вакуумно-технологическая подготовка разрядной камеры должна включать тепловое обезгаживание и тренировку стенок рабочей камеры. На поверхности рабочей камеры для теплового обезгаживания, прогрева и уплотнения вакуумных конструктивов монтируются ленточные нагреватели. Система очистки поверхности камеры тлеющим разрядом служит для очистки и прогрева внутренней поверхности рабочей камеры и состоит из источника питания тлеющего разряда и емкости с гелием. Устройство боронизации предназначено для нанесения плазмохимическим методом защитной боруглеродной пленки на внутреннюю поверхность рабочей камеры. Устройство боронизации состоит из блока питания, нагревателя и емкости с карбораном и монтируется на патрубке рабочей камеры. Потребляемая устройством электрическая мощность не превышает 1 кВт.

**Операция прогрева РК.** Камера и патрубки должны прогреваться до  $t = 200$  °С с целью теплового обезгаживания и уплотнения вакуумных конструктивов. Процесс должен проходить с обеспечением контроля равномерности прогрева. Оборудование для прогрева размещается вокруг камеры КТМ. Для обеспечения равномерности прогрева камера КТМ разделена на 50 секторов, в каждом из которых уложен ленточный нагреватель. В качестве ленточных нагревателей используется кабель КНМСНХ-0.283ТУ 16.505.564-75, наружным диаметром 3 мм и сопротивлением 4,5 Ом/м. Отрезки кабеля длиной 12 м укладываются с шагом 70 мм на наружной поверхности камеры. Напряжение питания нагревателей 220 В, ток нагревателя 4 А. Общая установленная мощность нагревателей 45 кВт при общем количестве ветвей 50 шт. Для обеспечения равномерности нагрева всей поверхности камеры через каждые 50 °С температура стабилизируется и поддерживается постоянной пока не уравнивается во всех секторах камеры.

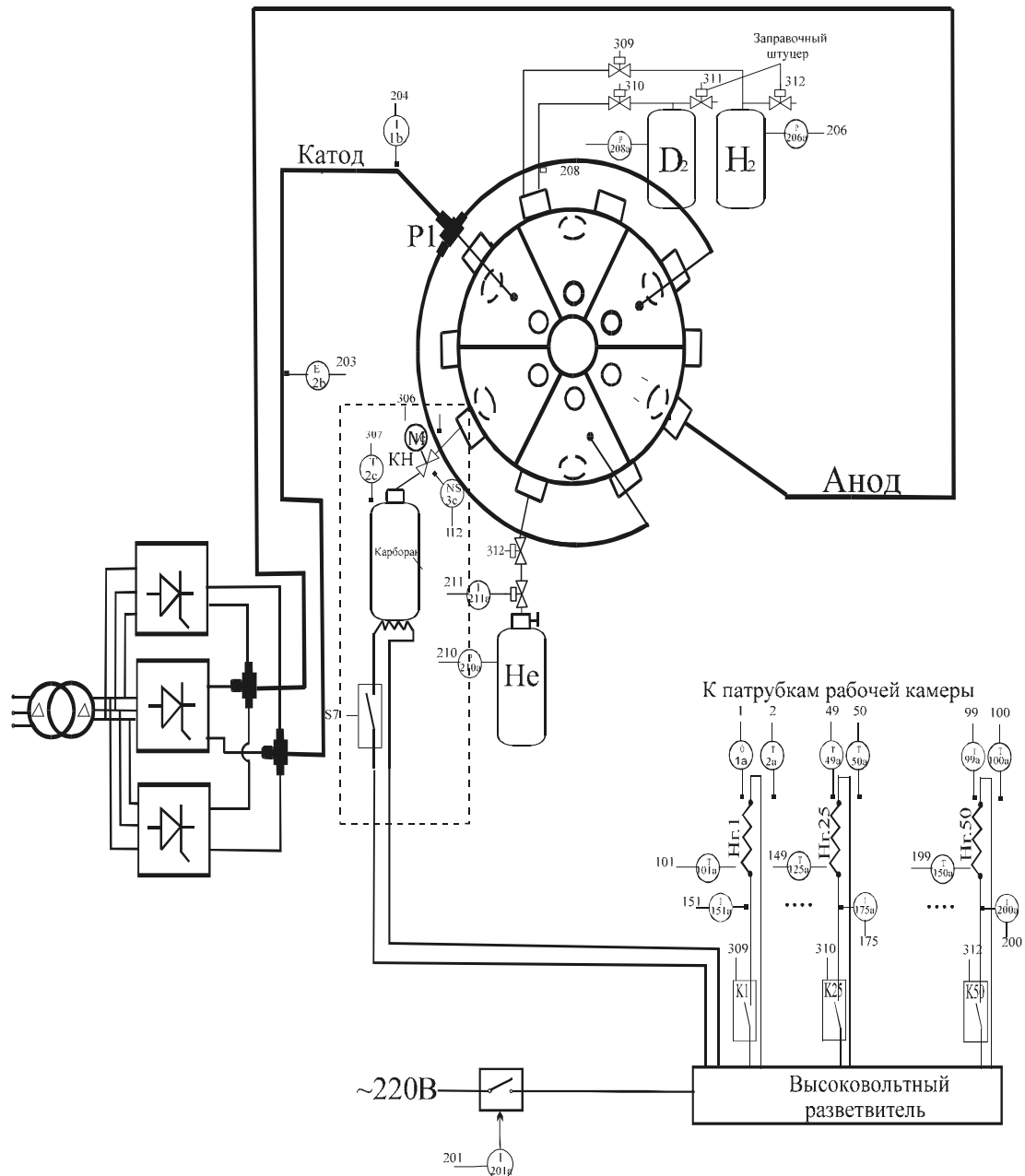


Рис. 2.1. Функциональная схема автоматизации системы подготовки рабочей камеры КТМ:

*КН* – клапан-напекатель; *УБ* – устройство боронизации;  
*Нг1–Нг50* – электронагреватели; *Р1, Р2* – разветвители цепей анода и катода;  
*Тр1* – трансформатор напряжения; *ТПП* – тиристорный преобразователь

Сектор по длине составляет 0,5 м (в экваториальной области). Количество точек измерения температуры на каждый сектор равно 2 шт.

Таким образом, количество измерительных каналов температуры составляет 100 шт. Использование датчиков температуры в условиях ТОКАМАКа затруднено наличием мощного магнитного поля (статического и динамического), сложностью конструкции и наличием вакуум-

ных условий в камере КТМ, что определяет дополнительные требования к линиям связи, соединяющим датчики с измерительными преобразователями и точками подключения линий связи к датчикам.

Магнитные поля могут оказывать существенное влияние на показания и работоспособность датчиков, основанных на преобразовании физического параметра в электрический сигнал, вследствие чего многие из них не рекомендуется применять в установках типа ТОКАМАК. Большой опыт применения датчиков теплотехнического контроля в активных зонах ядерных реакторов различных типов показал их большие возможности для целей исследований, контроля и защиты. Это прежде всего относится к термоэлектрическим преобразователям (ТЭП) на основе термопарных кабелей градуировок ХА(К) и ХК(L) с оболочками из коррозионно-стойкой стали или жаростойких сплавов и магнезиальной изоляцией. Кабели и датчики из них, получаемые методами волочения, прокатки,ковки, имеют высокую стойкость к тепловым ударам, вибрациям, механическим нагрузкам. Погрешность показаний ТЭП(ХА) диаметром 1,5 мм при перепаде температур 100 °С и средней температуре 90 °С составляет 2,2 °С в магнитном поле 3 Тл. Поскольку напряженность магнитного поля в ТОКАМАКе не будет превышать 1 Тл, то погрешность измерения будет незначительной.

**Операция очистки рабочей камеры.** Для очистки камеры ТОКАМАКа КТМ можно использовать тлеющий разряд в среде гелия. При этом в результате бомбардировки стенки камеры горячими атомами происходит десорбция со стенок прочно внедрившихся газов примесей, таких как кислород и окись углерода. После прекращения разряда небольшая часть этих примесей откачивается вакуумной системой. Для очистки и разогрева внутренней поверхности рабочей камеры используют плазменный разряд малой мощности, который называют также тренировочным. Откачка производится после каждого тренировочного разряда.

В результате частого повторения тлеющих разрядов и откачки за один раз небольшого количества примесного газа стенки камеры после многих циклов будут очищены, и можно будет начинать работать с плазмой. Также следует отметить и тот факт, что процесс очистки камеры проходит при наличии рабочего газа (гелия или аргона), подаваемого от системы напуска газа, при этом вместе с примесями одновременно будет откачиваться и значительное количество рабочего газа. Применение устройств селективной откачки (т. е. насосов, которые качают только – кислород, азот, окись углерода) дало бы возможность эффективно проводить очистку без потребления рабочего газа. Процесс очистки происходит следующим образом. Перед началом тлеющего разряда рабочая камера откачивается высоковакуумной системой до  $10^{-5}$  Па. Да-

лее через систему напуска газа подается гелий. После того как камера заполняется смесью, на электроды расположенные под углом  $120^\circ$  градусов друг относительно друга подается напряжение и происходит пробой. Разряды возбуждаются источником питания, рассчитанным на требуемые напряжения электродов и размещенным вблизи ТОКАМАКа.

Тлеющий разряд может протекать либо в непрерывном режиме, либо в импульсном в течение нескольких часов. Величина тока разряда задается управляемым источником питания, увеличивая или уменьшая мощность разряда.

**Операция боронизации рабочей камеры.** Поверхность внутренней стенки РК, конструктивные и технологические элементы, расположенные внутри РК, являются источником различных примесей, которые поступают в плазму в процессе разрядов. Нанесение на поверхность стенки камеры и других элементов специальной борууглеродной пленки является одним из основных способов снижения количества поступающих в плазму примесей и, улучшения, таким образом, характеристики получаемой в ТОКАМАКе плазмы. В последнее время для этой цели используют технологию нанесения тонкого слоя бора на внутреннюю поверхность камеры, который, в свою очередь, является защитным. Процесс напыления защитной пленки с помощью тлеющего разряда в газе карборан ( $C_2B_2H_{10}B_{10}$ ) называют боронизацией. В процессе боронизации проведенной на ТОКАМАКах типа Т-11М и Т-3М использовались следующие параметры тлеющих разрядов: давление 0,1–1 Па, напряжение 650 В, ток разряда 5А, температура стенки камеры  $120^\circ C$ , время боронизации 2 часа. Чтобы провести процесс боронизации, необходимо зажечь тлеющий разряд в среде буферного газа (в нашем случае гелия), а затем при низком значении тока тлеющего разряда напустить газ карборан в РК ТОКАМАКа. Плазмохимическое напыление карборана на стенки РК происходит при высоком значении тока тлеющего разряда. Карборан, находящийся в нормальных условиях в кристаллическом состоянии, подается через патрубок камеры (разогретый при этом до  $200^\circ C$ ) в рабочую камеру ТОКАМАКа. Управление обеспечивается клапаном-натекателем. Карборан, напущенный в камеру, смешивается с гелием (гелий выступает в качестве рабочего газа), который, в свою очередь, напускаются системой напуска газа. При боронизации разряд начинают в гелии, который является закрепляющим элементом. Чтобы улучшить процесс нанесения борууглеродной пленки, стенки камеры нагреваются до температуры от  $50^\circ C$  до  $200^\circ C$ . Процедура боронизации занимает от 3 до 4 часов. Чтобы контролировать качество покрытия стенок используются собирающие зонды, которые размещаются в камере. После боронизации эти зонды исследуются с помощью специально-



го анализатора. Тлеющий разряд при боронизации происходит в импульсном режиме при токе от 0,5 до 5 А. Цель импульсного режима состоит в том, чтобы парциальное давление карборана стало более равномерным по обходу камеры в течение разряда с низкой мощностью, и затем, в течение разряда с высокой мощностью, нанесение пленки было более равномерным.

## 2.2. Описание автоматизируемых функций

На основе анализа, проведенного в пункте 2.1, можно определить состав функций автоматизации, который необходимо обеспечить в процессе ПРК. Рассмотрим операцию прогрева РК. Для данной операции необходимо обеспечить выполнение следующих функций автоматизации:

- измерение температуры в 100 точках поверхности камеры (по 2 точки на каждый сектор камеры);
- выполнение сбора и регистрации измеренных значений температуры в памяти вычислительного устройства с заданным периодом, цикл измерения не должен превышать 1 с;
- выработка на основе полученных данных сигналов управления на изменение состояния ключей в цепи ленточных нагревателей;
- контроль наличия тока в цепях ленточных нагревателей с целью обнаружения неисправностей в силовой части нагревателей;
- аварийная сигнализация при превышении температурой заданной величины и при отсутствии тока в цепях ленточных нагревателей.

Рассмотрим операцию очистки тлеющим разрядом. Для данной операции необходимо обеспечить выполнение следующих функций контроля и управления:

- измерение величины тока и напряжения в цепях тлеющего разряда;
- измерение давления в баллонах с гелием, водородом, дейтерием и другими рабочими газами, используемыми в процессе подготовки РК;
- получение данных о величине абсолютного давления в РК от системы высоковакуумной откачки;
- получение данных о парциальных давлениях примесных газов в РК от системы анализа остаточных газов;
- сбор и регистрация измерительной информации;
- выработка на основе полученных данных сигналов управления отсечными клапанами системы газонапуска;
- изменение напряжения на электродах тлеющего разряда в соответствии с заданной циклограммой очистки;
- аварийная сигнализация в случае возникновения неисправностей в работе источника питания тлеющего разряда.

Рассмотрим операцию боронизации РК. Для данной операции необходимо обеспечить выполнение следующих функций автоматизации:

- измерение давления в баллонах с гелием и другими буферными газами;
- получение данных о величине абсолютного давления в РК;
- измерение тока и напряжения тлеющего разряда при проведении операции боронизации;
- сбор и регистрация измерительной информации;
- выработка на основе полученных данных сигналов управления клапан-напекателями напуска гелия и карборана для поддержания заданных парциальных давлений;
- изменение напряжения на электродах тлеющего разряда в соответствии с циклограммой боронизации;
- аварийная сигнализация в случае возникновения неисправностей при работе источника питания тлеющего разряда.

К общим для всех операций ПРК функциям автоматизации относятся также:

- отображение параметров, характеризующих ход процесса ПРК, на экране пульта оператора технолога в виде мнемосхемы;
- сохранение значений параметров в архиве технологической информации;
- документирование информации о ходе процесса подготовки РК в виде отчета заданной формы;
- прием команд управления ходом процесса подготовки от оператора-технолога, вводимых с клавиатуры технологического пульта либо, с помощью манипулятора «мышь».

### **2.3. Обобщенный алгоритм подготовки рабочей камеры**

На рис. 2.2 представлен обобщенный алгоритм проведения процесса ПРК. Как видно из рисунка процесс ПРК состоит из трех операций, которые выполняются последовательно.

Первый этап ПРК – прогрев РК, на этом этапе выполняется прогрев камеры до  $T_k^{np} = 200 \text{ }^\circ\text{C}$  в соответствии с регламентом, а затем производится откачка газов из камеры с помощью системы высоковакуумной откачки до давления  $P_{\text{вак}} = 10^{-5} \text{ Па}$ . Необходимо отметить, что процесс откачки может происходить несколько часов подряд, и в течение этого времени система ПРК должна постоянно поддерживать температуру камеры на заданном уровне  $T_k^{np} = 200 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Второй этап ПРК – это операция очистки РК тлеющим разрядом. Перед проведением операции очистки необходимо изменить температуру камеры  $T_k$  до величины, при которой откачка идет наиболее эффективно.

После стабилизации температуры камеры на этом уровне выполняется включение систем питания тлеющего разряда и постепенное повышение величины напряжения до пробоя. Решение о завершении операции очистки принимается на основе данных системы анализа остаточных газов.

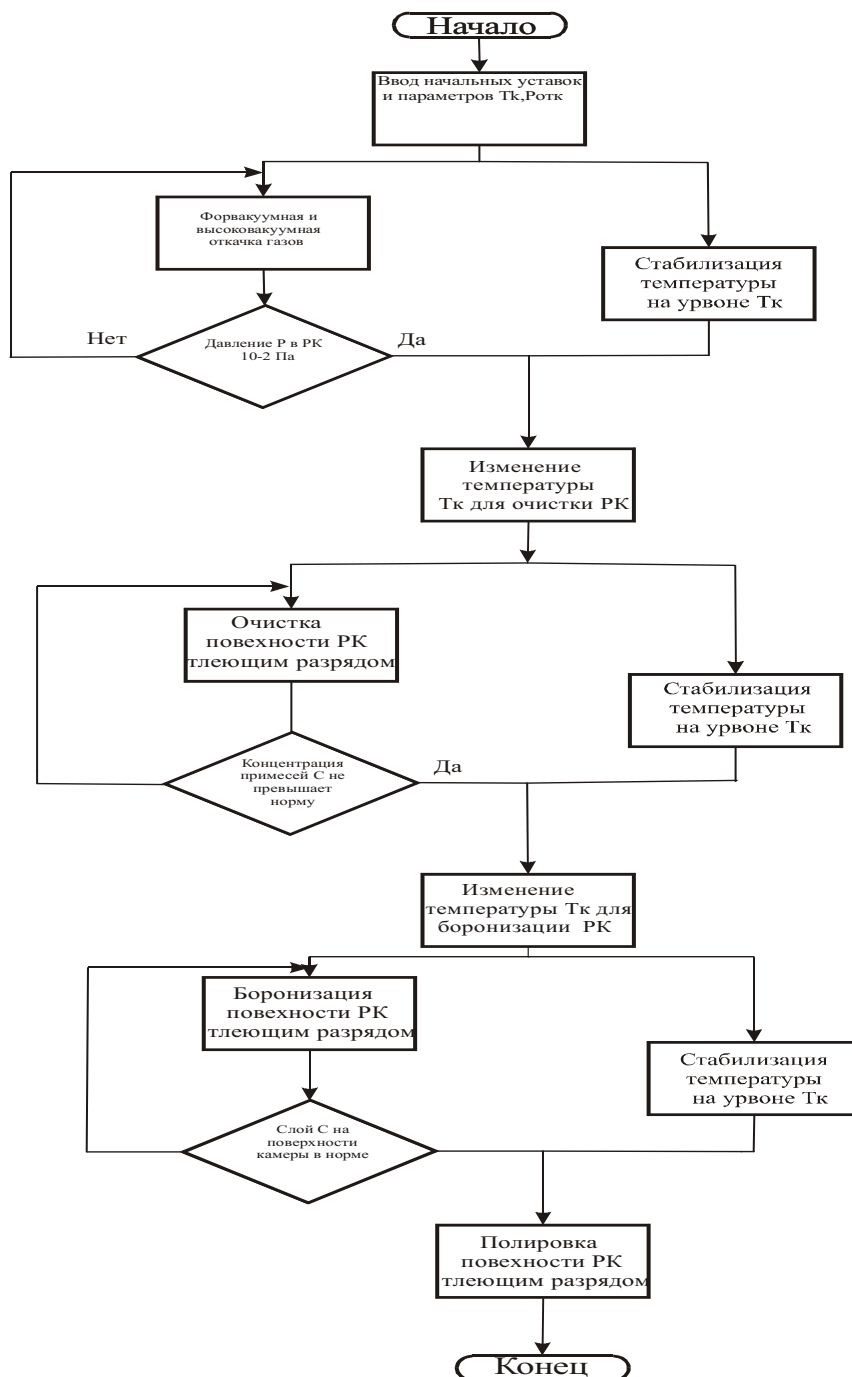


Рис. 2.2. Обобщенный алгоритм процесса ПРК

Третий этап – операция боронизации РК. Перед проведением операции боронизации необходимо вакуумировать камеру до абсолютного давления  $P_k = 10^{-5}$  Па и изменить температуру камеры  $T_k$  до величины,

при которой боронизация идет наиболее эффективно. После стабилизации температуры камеры на этом уровне выполняется включение систем питания тлеющего разряда и постепенное повышение величины напряжения до пробоя. Для увеличения давления насыщенных паров карборана необходимо включить подогрев баллона с карбораном. Решение о завершении операции боронизации принимается по результатам показаний выносных детекторов при достижении толщины пленки 100 нм.

#### **2.4. Автоматизация процесса прогрева рабочей камеры и патрубков КТМ**

С целью теплового обезгаживания и уплотнения вакуумных конструкций рабочая камера и патрубки должны прогреваться до температуры 200°C. Для этого РК оснащена системой прогрева, которая обеспечивает нагрев и поддержание температуры на поверхности камеры на заданном уровне в режиме подготовки камеры к работе и по мере необходимости в процессе эксплуатации установки. Процесс должен проходить с обеспечением контроля равномерности прогрева.

Операция прогрева проводится в течение 10–20 часов при непрерывной вакуумной откачке. Контроль за степенью очистки вакуумной камеры производится по показаниям масс-спектрометрического прибора при регистрации масс-спектров кислорода (массовое число 16 и 32), воды (18), углеводородов (С-Н-13, 14, 15), азота (14 и 28). Прогрев прекращается по достижению парциальных давлений перечисленных выше примесей минимально допустимых значений, которые не должны изменяться в течение последних двух часов.

В состав элементов системы прогрева входят: электронагреватели, термопары, теплоизоляция.

Основная задача управления процессом прогрева заключается в регулировании температуры внутренней поверхности камеры. Для решения этой задачи на поверхности камеры в пределах укладки каждой ветви установлена пара термопар, представляющих собой термостойкий кабель КТМС (ХА) ТУ505.757-75. Таким образом, контроль и поддержание температуры осуществляется путем автоматизированного измерения сигналов с термопар и коммутации тока в цепях питания нагревателей. Для обеспечения надежной работы системы прогрева возможна установка резервных термопар по одной в каждом из секторов камеры.

Так как сигнал с термопар низковольтный (0–40 мВ), длина линий связи не должна превышать 10-ти метров и потенциал в месте установки термопар может составлять при пробое обмоток ЭМС более 1000 В, поэтому для нормализации сигнала необходимо использовать блоки предварительного усиления с гальванической развязкой входа от выхода.

Поскольку процесс прогрева инерционный, заданная точность регулирования может быть достигнута с помощью двухпозиционного регулирования, следовательно, в качестве исполнительных механизмов целесообразно использовать недорогие устройства коммутации тока, включаемые в цепь питания каждого из нагревателей. В качестве таких устройств можно предложить твердотельное оптоэлектронное однофазное реле 5П19.10ТМ1-10-6 (ЗАО Протон-Импульс). Технические характеристики реле: коммутируемое напряжение – 240 В, коммутируемый ток – 4 А, напряжение изоляции – 4000 В, контроль перехода фазы коммутируемого напряжения через «0».

**Расчет параметров настройки регулятора температуры.** При разработке системы подготовки рабочей камеры (СПРК) важным является вопрос обеспечения качества регулирования температуры рабочей камеры (РК). Релейный регулятор должен обеспечить погрешность поддержания температуры РК около заданного значения не более 5 %. Для достижения этой цели выполним расчет параметров настройки регулятора.

Прогрев РК от температуры окружающей среды до температуры откачки производится путем одновременного включения всех нагревателей при соблюдении условия равномерного теплообмена. Прогрев камеры до рабочей температуры предполагается проводить со стабилизацией температуры камеры на нескольких промежуточных уровнях. После прогрева камеры до 200 °С включается система автоматического регулирования температуры РК. Система должна поддерживать температуру РК не менее 10–20 часов при непрерывной вакуумной откачке.

Для упрощения расчетов будем рассматривать динамику изменения температуры для одного сектора РК. Так как теплопередача между секторами происходит через лист нержавеющей стали толщиной 5 мм, а точка контроля температуры соседнего сектора находится на расстоянии 250 мм, то коэффициент теплопередачи между секторами принимаем равным 0. Тепловыделение по площади сектора считается равномерным во всех точках, теплообмен камеры с внешней средой и через вакуум не учитывается.

Определим исходные данные для расчета динамики температуры сектора:

Масса сектора	50 кг
Теплоемкость сектора	460 Дж/кг °С
Максимальное отклонение температуры сектора от нормы	±10 °С
Номинальное значение температуры сектора	200 °С
Мощность, излучаемая одним сектором при 200°С	180 Вт
Мощность нагревателя, расположенного на секторе	900 Вт
Площадь поверхности сектора	3,2 м <sup>2</sup>

Уравнение теплового баланса для сектора имеет вид:

$$\frac{dQ}{dt} := F1 - s \cdot k \cdot (Tk - Tv), \quad (2.1)$$

где  $F1$  – поток тепла подводимый к сектору, равный мощности нагревателя;  $Tk$  – начальная температура сектора (в расчетах принята за  $20^\circ\text{C}$ );  $Tv$  – температура окружающего воздуха (в расчетах принята за  $20^\circ\text{C}$ );  $k$  – коэффициент теплопередачи между поверхностью рабочей камеры и внешней средой.

Произведем оценку коэффициента  $k$ . Т. к. при  $200^\circ\text{C}$  сектор излучает мощность  $180\text{ Вт}$ , то  $k$  можно оценить по формуле:

$$k := \frac{180}{s \cdot \Delta T}$$

Требуемое приращение температуры  $\Delta T = 180^\circ\text{C}$  (при температуре окружающего воздуха  $20^\circ\text{C}$ ), отсюда  $k = 0,32\text{ Вт/м}^2\text{ }^\circ\text{C}$ .

Преобразуем выражение (2.1):

$$\frac{dQ}{DT} := F1 - s \cdot k \cdot (Tk - Tv), \quad (2.2)$$

$$Q := c \cdot m \cdot dTk; \quad (2.3)$$

$$c \cdot m \cdot \frac{dT_k}{dt} := F1 - s \cdot k \cdot Tk + s \cdot k \cdot Tv; \quad (2.4)$$

$$\frac{dT_k(t)}{dt} := p \cdot T(p) - T(0); \quad (2.5)$$

$$c \cdot m \cdot p \cdot Tk(p) := F1 - s \cdot k \cdot Tk(p) + Tv \cdot s \cdot k; \quad (2.6)$$

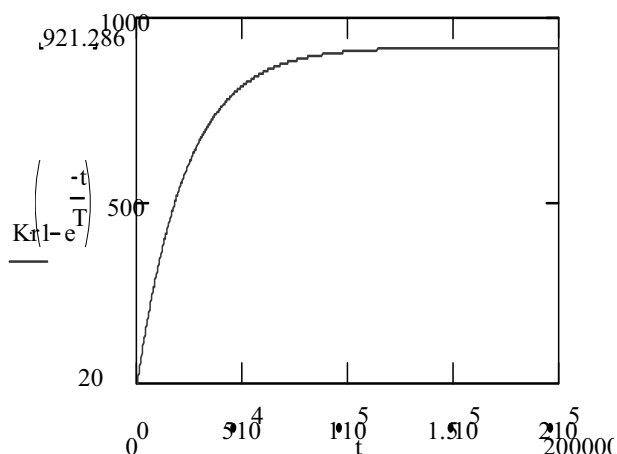
$$Tk(p) \cdot (c \cdot m \cdot p + s \cdot k) := F1 + Tv \cdot s \cdot k; \quad (2.7)$$

$$Tk(p) := \frac{\left[ \left( \frac{F1}{s \cdot k} \right) + Tv \right]}{\left( c \cdot \frac{m}{s \cdot k} \right) \cdot p + 1}; \quad (2.8)$$

Выражение (2.8) представляет собой передаточную функцию тора, где:

$$Kr := \left( \frac{F1}{s \cdot k} \right) + Tv; \quad T := c \cdot \frac{m}{s \cdot k}.$$

Переходный процесс имеет вид:



$$K_T := \left( \frac{F1}{s \cdot k} \right) + T_v; \quad T := c \cdot \frac{m}{s \cdot k}. \quad K_T = 921,442; \quad T = 2,304 \cdot 10^4$$

Решение уравнения (2.1) выполнено методом Эйлера на ЭВМ. Расчетный коэффициент передачи объекта  $K = 921,442$ .

На основании полученных результатов моделирования можно сделать вывод о том, что процесс прогрева очень инерционный, и поэтому при выведении РК на рабочую температуру ( $200 \text{ }^\circ\text{C}$ ) на поверхности тора не должно возникать больших температурных градиентов, связанных с перекрестными связями в объекте управления.

Таким образом, процесс управления может быть организован следующим образом. В начальный момент времени включаются все нагреватели секторов, и в течение процесса нагрева осуществляется контроль за температурой рабочей камеры. При возникновении в стенках камеры критического температурного градиента в  $20 \text{ }^\circ\text{C}$  производится стабилизация на данном уровне с выравниваем температуры по всей поверхности. После выравнивания происходит дальнейший нагрев тора.

Таким образом, планируется нагревать камеру до установленной температуры и поддерживать её температуру на заданном уровне с помощью регуляторов с коэффициентом передачи:

$$K_T = T_{\text{вых}}/F1 = 921,442 \text{ }^\circ\text{C}/900 \text{ Вт} = 1,023 \text{ }^\circ\text{C}/\text{Вт}.$$

Найдем границы зоны неоднозначности для реле. Зададимся начальными условиями для расчета:

$\tau = 10 \text{ с}$  – время чистого запаздывания объекта управления;

$T = 2,304 \cdot 10^4 \text{ с}$  – постоянная времени объекта;

$\Delta = 2,5 \text{ \%}$  – допустимое отклонение выходной координаты от заданного значения в процентах от шкалы термопреобразователя;

$\Theta_0 = 50 \%$  – заданное значение выходной координаты в процентах от шкалы термопреобразователя;

$\Theta_{\max} = 100 \%$  – значение выходной координаты в процентах от шкалы термопреобразователя при постоянно включенном реле;

$\Theta_{\min} = 5 \%$  – значение выходной координаты в процентах от шкалы термопреобразователя при постоянно выключенном реле.

Рассчитаем относительные отклонения выходной координаты, соответствующие управляющим воздействиям (реле включено – реле выключено соответственно):

$$\Theta 1 := \frac{\Theta_{\max} - \Theta_0}{\Theta_0}; \quad \Theta 2 := \frac{\Theta_0 - \Theta_{\min}}{\Theta_0};$$

$$\Theta 1 = 1; \quad \Theta 2 = 0,9.$$

Рассчитаем относительное смещение из-за несимметрии:

$$\varepsilon := \left[ \frac{(\Theta_0 - \Theta_{\min}) - (\Theta_{\max} - \Theta_0)}{\Theta_0} \right] \cdot \frac{1 - e^{\left(\frac{-\tau}{T}\right)}}{2} \varepsilon = -4,338 \cdot 10^{-5}.$$

Переведем смещение в абсолютные единицы:

$$\Delta \varepsilon := \varepsilon \cdot \Theta_0; \quad \Delta \varepsilon = -2,169 \cdot 10^{-3}.$$

Рассчитаем смещенное значение выходной координаты:

$$\Theta_{\text{см}} := \Theta_0 + \Delta \varepsilon; \quad \Theta_{\text{см}} = 49,998.$$

Вычислим относительный заданный размах автоколебаний выходной координаты:

$$\Delta \Theta := 2 \cdot \frac{\Delta}{\Theta_0}; \quad \Delta \Theta = 0,1.$$

Рассчитаем относительную зону неоднозначности:

$$a := \frac{\Delta \Theta - (\Theta 1 + \Theta 2) \cdot \left[ 1 - e^{\left(\frac{-\tau}{T}\right)} \right]}{e^{\left(\frac{-\tau}{T}\right)}}; \quad a = 0,098.$$

Абсолютная зона неоднозначности, симметричная относительно смещенного заданного значения выходной координаты:

$$A := a \cdot \Theta_0; \quad A = 4,922.$$

Рассчитаем уровень включения реле ленточного нагревателя, выраженный в процентах от шкалы измерительного преобразователя:

$$\Theta_{\text{нижн}} := \Theta_{\text{см}} \cdot \frac{A}{2}; \quad \Theta_{\text{нижн}} = 47,537.$$



Рассчитаем уровень выключения реле ленточного нагревателя, выраженный в процентах от шкалы измерительного преобразователя:

$$\Theta_{\text{верхн}} := \Theta_{\text{см}} + \frac{A}{2}; \quad \Theta_{\text{верхн}} = 52,459.$$

Пересчитаем уровни включения и выключения реле в градусы Цельсия:

$$T_{\text{вкл}} = 400 \text{ }^\circ\text{C} \cdot 47,537 \% = 195,1 \text{ }^\circ\text{C} \text{ и } T_{\text{выкл}} = 400 \text{ }^\circ\text{C} \cdot 52,459 \% = 204,8 \text{ }^\circ\text{C}.$$

Таким образом, для поддержания температуры камеры на уровне 200 °С с абсолютной погрешностью +10 °С, необходимо задать на регуляторе уставки 195,1 °С и 204,8 °С.

**Алгоритм контроля и управления операциями прогрева.** Работа системы ПРК в режиме прогрева должна быть организована таким образом, чтобы обеспечивать надежную откачку примесных газов. В связи с тем, что технологическая процедура нагрева РК выполняется на этапе ее вакуумирования, совместный алгоритм работы ПСУ высоковакуумной откачки и нагрева камеры рассмотрен в разделе «ПСУ системой высоковакуумной откачки».

**Структура измерительного канала для контроля температуры.** В связи с тем, что доступ к первичным преобразователям температуры будет затруднен из-за конструктивных особенностей камеры и обмоток ЭМС, разрабатываемая система должна иметь высокую надежность на уровне первичных преобразователей. Для повышения надежности на каждый сектор РК монтируется 3 кабельных термопары КТМС(ХА) ТУ 505.757-75, две из которых будут использоваться, а третья будет резервной.

Для уменьшения влияния магнитного поля следует применять для передачи сигнала скрученные провода. Витая пара в экране, заземленном на одном конце, обеспечивает ослабление помех до 70 Дб. Таким образом, совместное применение витой пары с экранированием позволяет защитить линию связи от помех.

Структурная схема измерительного канала приведена на рис. 2.3.

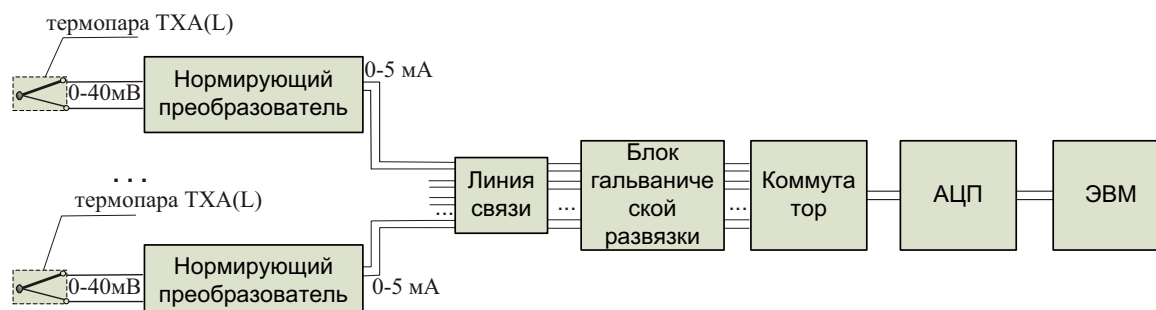


Рис. 2.3. Структура измерительного канала температуры

Сигнал термопары нормализуется при помощи преобразователя установленного «по месту». В нормирующем преобразователе сигнал преобразуется в токовый (0–5 мА) и передается по линии связи. Далее сигнал через блок гальванической развязки поступает на АЦП и в ЭВМ, где происходит его дальнейшая обработка.

Схема измерения, представленная на рис. 2.3, реализуется следующим образом. Сигналы от 4-х термопар, расположенных на двух соседних секторах РК, поступают на нормирующий преобразователь фирмы SDI-ATC3. ATC3 имеет встроенный блок гальванической развязки и питается от напряжения 10–30 В. Далее нормированный сигнал подается на АЦП фирмы Advantech PCL1713. Модуль PCL1713 выполняет 12-разрядное преобразование, имеет встроенный блок гальванической развязки, коммутатор на 15 измерительных каналов.

## **2.5. Автоматизация процесса очистки разрядной камеры КТМ**

Очистка разрядной камеры КТМ обеспечивается ионной бомбардировкой поверхности камеры, которая позволяет удалить с ее поверхности загрязнения и инородные включения, не удаляемые при электрополировке и при высокотемпературном прогреве. Важная функция данной операции – это удаление поверхностного барьера, что позволяет облегчить и ускорить выход растворенных в металле газов.

На термоядерных установках типа ТОКАМАК, например Т-15, Т-10, JT-60, TFTR для ионной бомбардировки разрядной камеры обычно используются тлеющий разряд, индукционный нагрев, электронно-циклотронный (ЭЦР) и ионно-циклотронный (ИЦР) разряды в среде рабочего газа дейтерия или других газов. Такие разряды также называют тренировочными, в отличие от рабочих. При этом в результате бомбардировки стенки камеры горячими атомами происходит десорбция со стенок камеры прочно внедрившихся газов примесей, таких как кислород и окись углерода.

Контроль степени очистки вакуумной камеры проводится аналогичным способом, как и в случае высокотемпературного прогрева. Разряд прекращается при достижении в газовой среде камеры минимальных значений вышеуказанных примесей, если эти значения сохраняются неизменными в течение получаса соответствующего разряда. После прекращения разряда часть этих примесей откачивается системой высоковакуумной откачки (СВВО). Откачка примесей производится после каждого тренировочного разряда.

На установке КТМ на начальном этапе эксплуатации для очистки и дополнительного прогрева камеры предполагается использовать тлеющий разряд заданной длительности в среде гелия. При этом после разряда должна выполняться откачка примесей до заданного уровня разрежения в камере и последующего выполнения операции боронизации, описываемой ниже. Следует отметить, что процесс очистки может происходить за несколько циклов, включающих напуск газа – тлеющий разряд – откачку.

Рассмотрим подробнее процесс очистки камеры КТМ. Перед началом тлеющего разряда рабочая камера откачивается СВВО до  $10^{-5}$  Па. Далее через систему напуска инертных газов подается гелий. В условиях ТОКАМАКа для напуска газа предпочтительнее использовать пьезоклапаны, так как они не чувствительны к электромагнитному полю. Такие клапаны изготавливаются на опытном заводе при ФТИ им. Иоффе.

На электроды подается напряжение разряда после того, как давление газа в камере становится равным  $5-10 \cdot 10^{-2}$  Па. Наибольшую равномерность разряда обеспечивает двухэлектродная схема, которая состоит из 3-х катодов расположенных в камере под углом 120 градусов относительно друг друга, анодом служит сама камера. Электроды вводятся в камеру через диагностические патрубки КТМ.

Разряды возбуждаются соответствующим источником питания, размещенным вблизи ТОКАМАКа. Количество независимых регулируемых каналов питания должно быть не менее трех.

Тлеющий разряд производится путем формирования напряжения заданной величины на выходе регулируемого источника питания. Величина тока разряда при этом должна контролироваться непрерывно и изменяться в процессе разряда в соответствии с заданной циклограммой. Целью изменения тока разряда по циклограмме является получение давления газа, увеличивающегося равномерно внутри камеры в течение очистки.

В качестве источника питания тлеющего разряда может быть использован тиристорный преобразователь, выполненный по трехфазной мостовой схеме. Необходимо отметить, что управление таким источником питания включает в себя три канала измерения фазы питающего напряжения и шесть каналов управления тиристорами.

Все требования, накладываемые на измерительные преобразователи и исполнительные механизмы, а также на структуру измерительных каналов, аналогичны рассмотренным для процесса прогрева рабочей камеры.

Контроль давления газов в камере в процессе боронизации выполняется с помощью датчиков давления системы высоковакуумной откачки.

**Разработка алгоритма очистки РК.** Очистка стенок рабочей камеры перед проведением экспериментов разрядов является очень важной технологической операцией. На основе анализа литературных ис-

точников по очистке рабочей камеры был разработан алгоритм очистки РК, показанный на рис. 2.4.

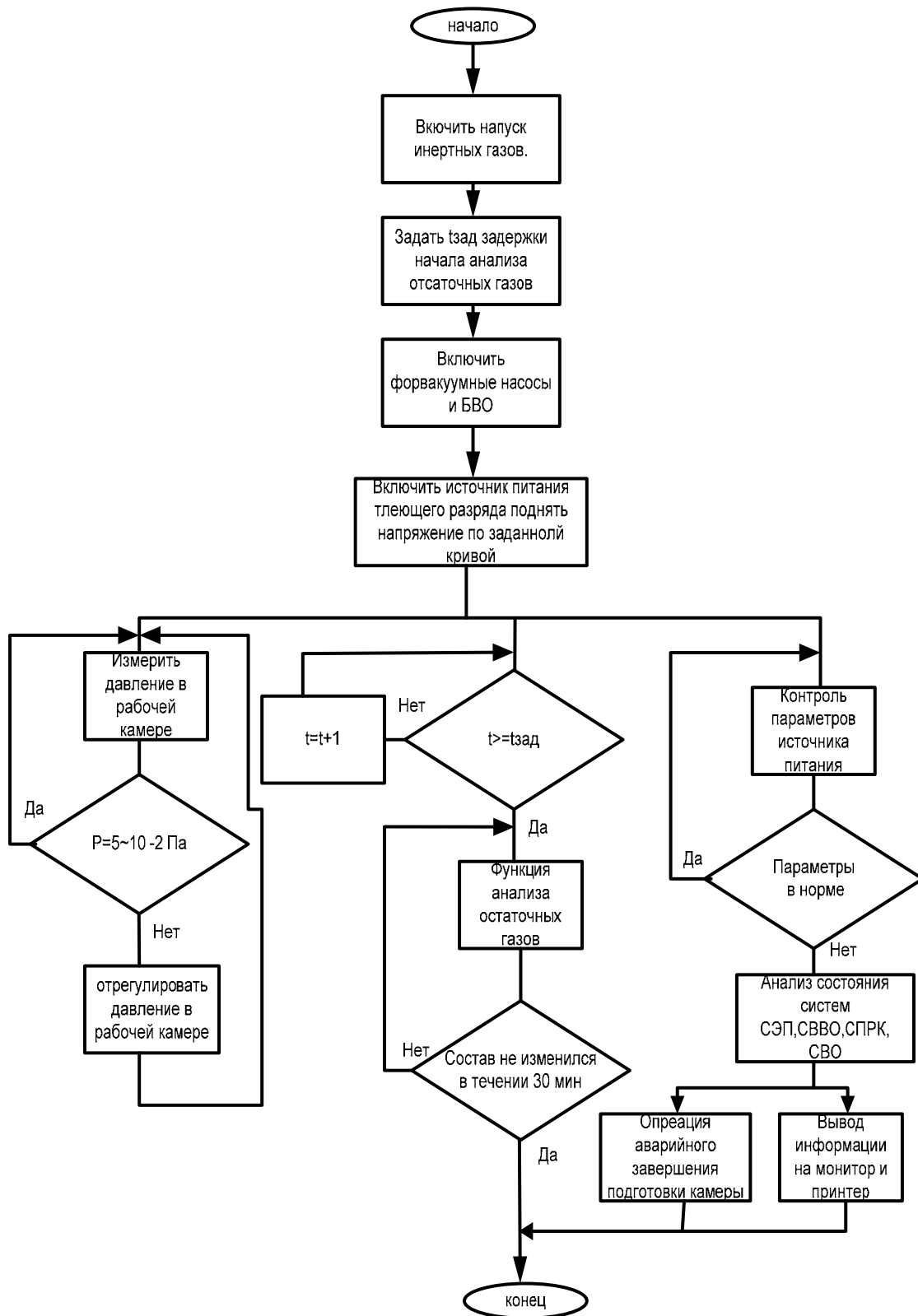


Рис. 2.4. Схема алгоритма очистки РК

При циклической работе системы очистки в процессе выбивания примесей из стенок камеры насыщенность примесей в газе увеличивается, и резко повышается вероятность возврата молекул примесей в микротрещины стенок. Для устранения этого недостатка предлагается производить прокачку рабочего газа через камеру непрерывно в течение тлеющего разряда. Для этих целей можно использовать клапан-натекатель инертных газов для напуска газа, форвакуумные насосы и БВО для откачки. Для протекания стабильного тлеющего разряда с расчетными параметрами необходимо поддерживать давление в камере  $5 \sim 10^{-2}$  Па. Регулирование давления можно производить как со стороны клапан-натекателя, так и со стороны БВО и форвакуумных насосов.

Возможен так же и режим проведения очистки с периодически повторяющимся циклом «напуск гелия – тлеющий разряд – контроль парциальных давлений примесных газов – откачка». Проведение такого цикла работы должно происходить до полного исчезновения примесей.

Необходимо предусмотреть также, что в начале разряда выбитых примесных молекул в рабочем газе не будет, и подсистема управления, сделав вывод о достижении требуемой чистоты стенок, может выдать ложный сигнал на отключение источника питания тлеющего разряда, поэтому анализ остаточных газов необходимо производить с некоторой задержкой относительно момента включения источника питания тлеющего разряда.

С учетом вышесказанного можно сделать следующие рекомендации по организации технологического процесса очистки:

1. Прокачку рабочего газа необходимо производить непрерывно в течение тлеющего разряда, т. е. пьезоклапан и блок БВО должны постоянно работать, либо производить очистку циклически.

2. Необходимо производить стабилизацию давления газа в рабочей камере.

3. Анализ остаточных газов необходимо производить с некоторой задержкой относительно момента включения источника питания тлеющего разряда.

## **2.6. Автоматизация процесса боронизации камеры КТМ**

Появление примесей в плазме в течение плазменного разряда, которые затем оседают на стенки камеры, в дальнейшем приводит к ухудшению параметров разрядов. Для противодействия этому в последнее время широко применяется технология нанесения с помощью плазмохимического осаждения аморфной бороуглеродной пленки на внутреннюю поверхность камеры. Данный слой выполняет защитную функцию.

При нормальных условиях карборан является твердым порошкообразным веществом, который имеет высокое давление насыщенных паров (при 100 °С  $10^{-1}$  Па). Для проведения процесса боронизации карборан одновременно с инертным газом напускают в вакуумную камеру ТОКАМАКа с помощью клапана-накателя, путем его плавного подогрева от 20 °С до 200 °С. При этом устройство боронизации должно размещаться вблизи ТОКАМАКа и монтироваться непосредственно на патрубке камеры.

Управление напуском газа обеспечивается при помощи клапана-накателя. Карборан напускается в камеру до момента достижения давления около 10 Па. Создание вакуумных условий и откачка камеры предварительно осуществляется централизованной вакуумной системой.

Тлеющие разряды в процессе боронизации, как и при очистке камеры, достигаются подачей тока на электроды, но его величина должна изменяться по заданной циклограмме от 0,5 до 5 А. Цель циклограммы состоит в том, чтобы нейтральное давление карборана увеличивалось равномерно по обходу тора камеры.

Контроль давления газа в процессе боронизации выполняется с помощью датчиков давления системы высоковакуумной откачки.

**Определение требований к параметрам тлеющего разряда для процесса боронизации.** Тлеющий разряд при боронизации возникает в рабочей камере при тех же условиях, что и в процессе очистки. После инъекции, карборан поступает в рабочую камеру, затем молекулы, распространяясь по объему камеры, ионизируются под действием тлеющего разряда. Ионы разлетаются от положительно заряженного катода и ускоряются в направлении плоскости анода. Кинетическая энергия взаимодействия ион-стенки при падении ионов на анод (при напряжении 200–300 В) превышает энергию связи, следовательно, ионы диссоциируют (распадаются) и элементы вступают в поверхностные реакции, результаты которых образуют пленку на поверхности рабочей камеры.

Толщина пленки, создаваемой при боронизации составляет порядка 100 нм. Скорость напыления зависит от плотности тока тлеющего разряда, давления газа и температуры стенки. Толщина пленки обычно уменьшается в зависимости от расстояния до точки инъекции карборана и может отличаться на порядок. Чтобы уменьшить неоднородность покрытия стенок РК необходимо в течении 2 с при низком значении тока, равным 0,5 А, распылять газовую смесь карборана и гелия, а затем в течении 1 секунды использовать высокоточный 5 А тлеющий разряд. Такой режим разряда позволит получить более равномерное напыление.

По завершении боронизации стандартной процедурой является обработка поверхности, покрытой плазмохимической пленкой, с помощью тлеющего разряда в гелии, который является эффективным за счет того,

что удаляет протоки водорода из верхних слоев пленки и обеспечивает низкий коэффициент рециклинга.

**Алгоритм контроля и управления операциями боронизации.** Основной задачей разработки алгоритма контроля и управления операциями боронизации является нанесение равномерного слоя боруглеродной пленки на поверхность РК. Для этого сначала проводятся подготовительные операции, а именно: вывод камеры на температуру боронизации (она может варьироваться от 50 до 200 °С) и откачка газов из камеры до давления  $P = 10^{-5}$  Па. Затем необходимо напустить рабочий газ гелий. Карборан при нормальных условиях представляет из себя кристаллическое вещество, поэтому необходимо разогреть его до 200 °С, и под действием давления насыщенных паров через клапан-натекатель пары карборана попадут в РК, смешиваясь с гелием. После проведения первоначального напуска газов происходит включение источника питания тлеющего разряда и обеспечивается ток тлеющего разряда 0,5 А в течение 5 с, затем источник питания переводит тлеющий разряд в режим 5 А и закрывается клапан натекатель карборана. Аналогичный режим работы используется в ТОКАМАКе DIII-D, только боронизация производится в диборане. На рис. 2.5 показано изменение парциального давления диборана в течение импульсного разряда, измеренное анализатором остаточного газа.

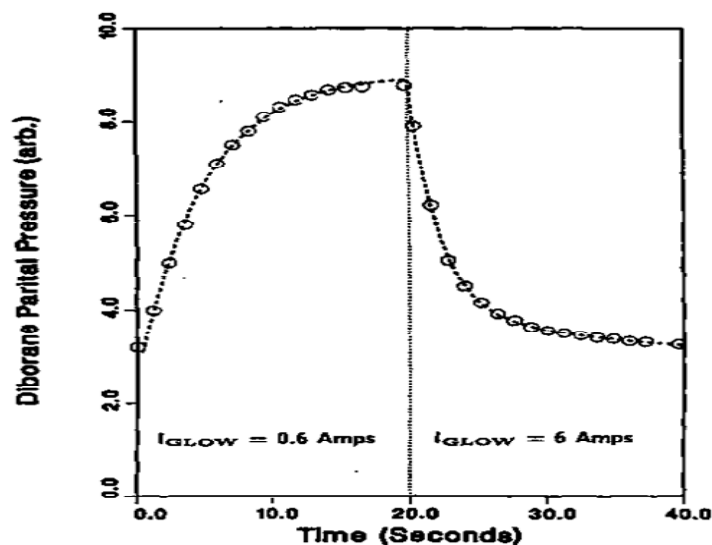


Рис. 2.5. Изменение парциального давления диборана в течение импульсного изменения тока тлеющего разряда

Парциальное давление растет в течение фазы низкого тока, а затем быстро падает в течение фазы высокого тока. Обычно длительности фаз более короткие, чем показано на рисунке, но более длительное время выбрано для того, чтобы проиллюстрировать постоянную распада. Процесс боронизации импульсным тлеющим разрядом занимает от 1 до 4 ч.

На основе вышесказанного разработан алгоритм представленный на рис. 2.6. В работе алгоритма так же предусмотрена операция аварийного завершения операции в случае возникновения технических неполадок.

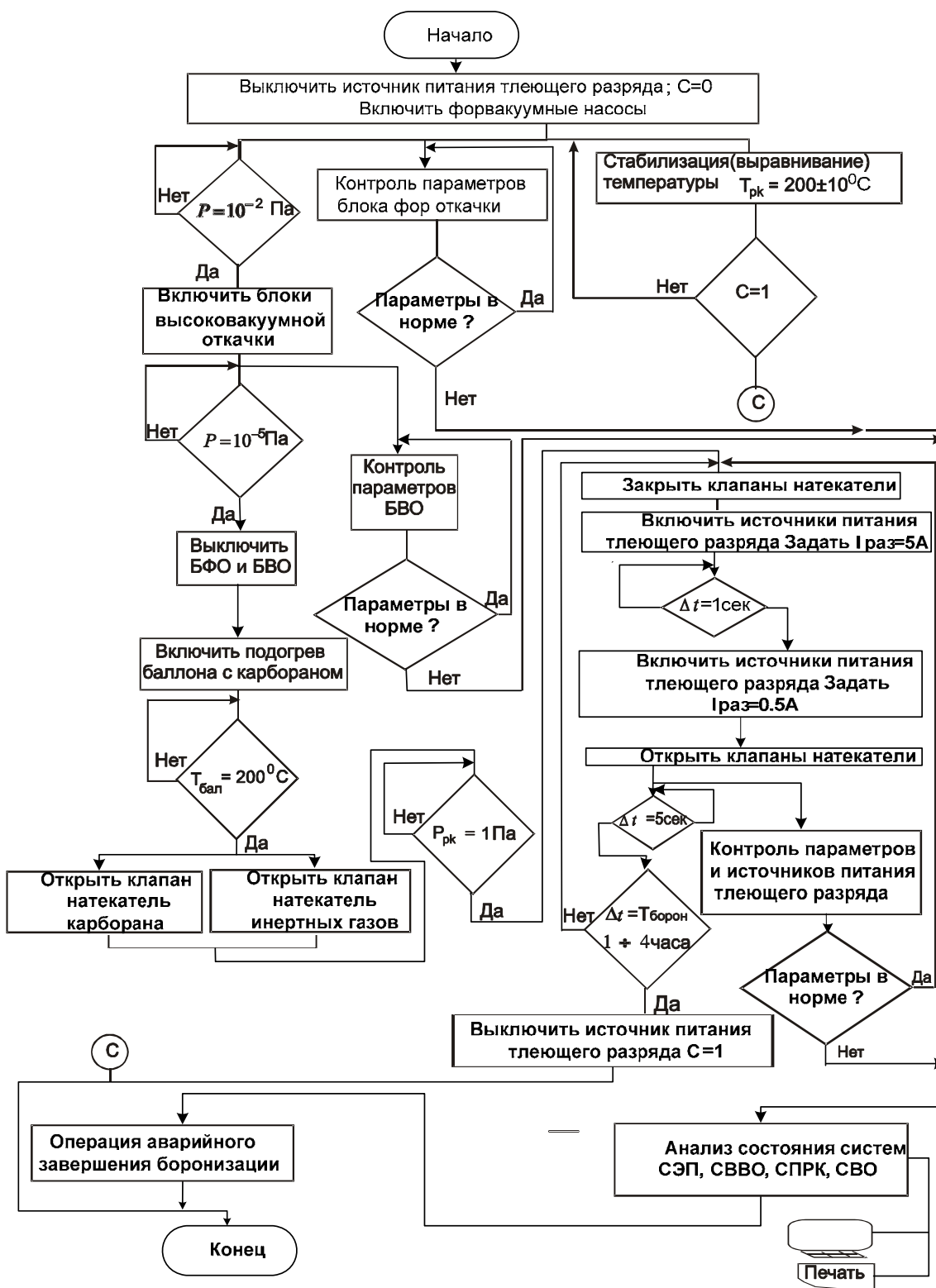


Рис. 2.6. Алгоритм боронизации



## 2.7. Описание функциональной схемы автоматизации системы ПРК

Рассмотрим функциональную схему автоматизации системы ПРК, представленную на рис. 2.1.

Для измерения температуры РК в системе ПРК предусмотрены датчики на поверхности камеры. Каналы 1–100 предназначены для измерения температуры в секторах РК. Каналы 101–150 служат для получения информации от датчиков тока в ленточных нагревателях. Питание на ленточные нагреватели коммутируется ключами К1-К50, управление ключами происходит по каналам 309–359. Для включения общего питания ленточных нагревателей имеется канал 201.

Рассмотрим каналы, используемые для напуска различных газов в РК. Напуск газов в РК осуществляется с помощью каналов управления 1с, 211, 309 и 310, получение информации о давлениях He, карборана, D<sub>2</sub> и H<sub>2</sub> происходит по каналам 206, 208, 210, 307.

Для нагрева баллона с карбораном используется нагреватель, управляемый реле по каналу 7.

Ток в выходной цепи источника питания тлеющего разряда контролируется с помощью канала 203, напряжение по каналу 204.

Общий перечень точек контроля и управления для системы управления процессом подготовки показан в табл. 2.1.

Таблица 2.1

*Перечень точек контроля и управления процессом ПРК*

№	Процесс	Наименование	Тип	Кол-во	Перв. преобраз.	Диап. изм.	Ед. изм.	Вх/вых сигн.	Обоз-е на схеме	Примечания
1	прогрев камеры	точки контроля температуры	к	100	термопара, тип	0–250	С	0–40 мВ	1а–100а	
		вкл/откл цепи электронагревателя	у	50	реле 220 В, 4 А	–	С		309–359	
		точки контроля тока в ветви	к	50	трансф. тока	0–4А	А		101–150	
		вкл/откл общего питания	у	1	замыкатель 220 В, 150 А	–	–		201а	
Итого				201						

Окончание табл. 2.1

№	Процесс	Наименование	Тип	Кол-во	Перв. преобраз.	Диап. изм.	Ед. изм.	Вх/вых сигн.	Обоз-е на схеме	Примечания
2	Очистка тлеющим разрядом в среде аргона, гелия	канал контроля тока на электродах	к	3	трансф. тока	0–5	А		203	
		давления в баллонах H <sub>2</sub> , D <sub>2</sub> , He, Ar, O <sub>2</sub>	к	5	манометр	0,1–15	МПа		206, 208, 210, 307	
		вкл/выкл источником питания	у	1	трансф. напр.	0–2000	В		2b	
		напряжения тлеющего разряда	у	3	тиристорный преобразователь	0–2000	В		204	6 управляющих точек и 3 измерительных
Итого				12						
3	Боронизация	канал упр. клапан-накателем дозатора	у	1	эл. магн. клапан	–	–	0–100 В	1c	
		канал вкл/выкл. нагревателя карборана	у	1	реле 220 В, 4 А	–	–		s7	
		канал контр за температурой карборана	у	1	термопара	0–200	С		307	
Итого				3						
4	Напуск рабочих газов	регулируемый напуск рабочих газов	у	2	пьезоклапан	–	–	0–200 В	309–310	
		откр/закр отсечных клапанов	у	5	эл. магн. клапан	–	–	0–100 В	311–312	
Итого				7						
Всего				223						

## 2.8. Структура комплекса технических средств ПСУ системой ПРК

На основании разработанной функциональной схемы, представленной на рис. 2.1, можно предложить схему размещения устройств системы автоматизации процесса ПРК, показанную на рис. 2.7.

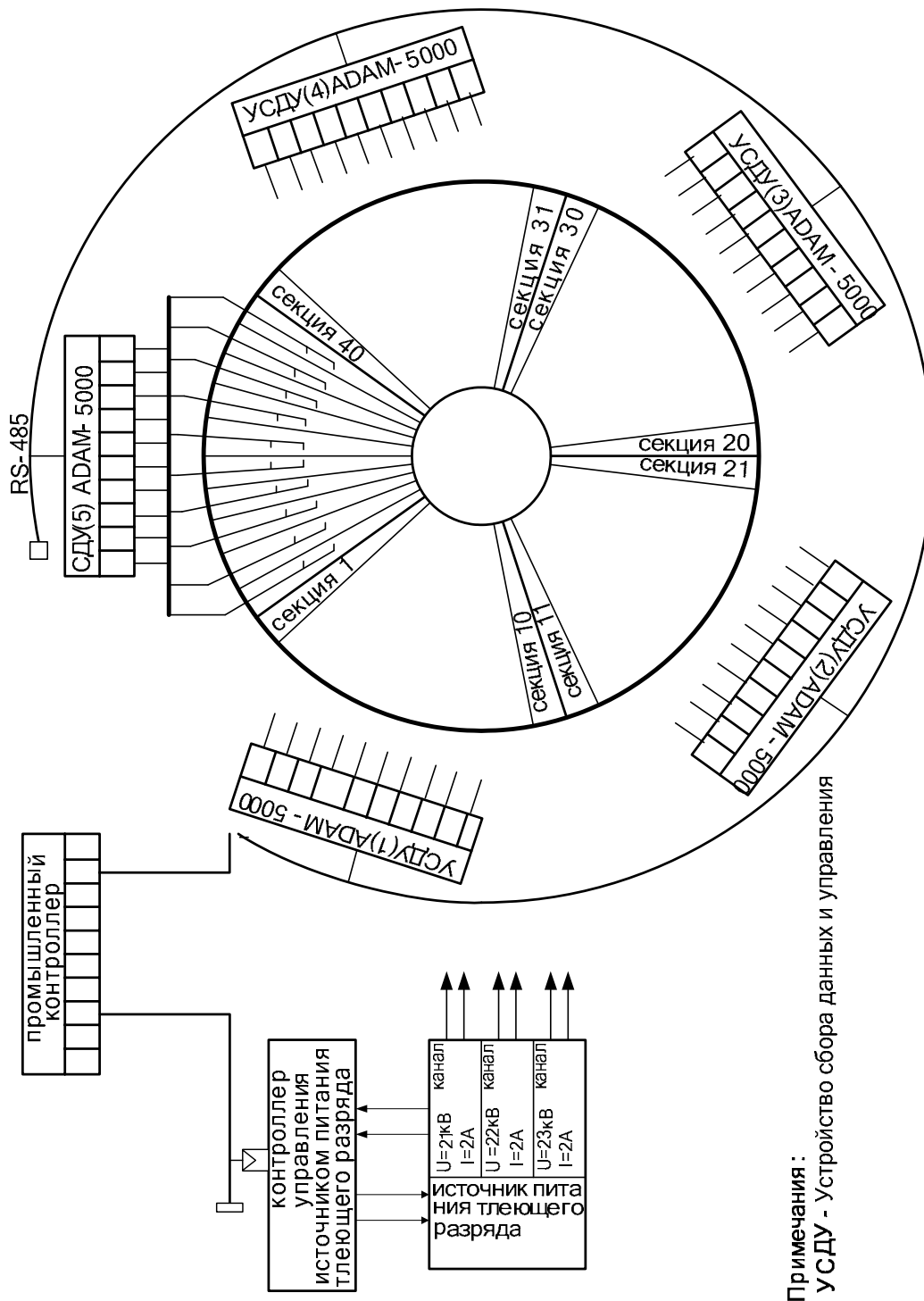


Рис. 2.7. Схема размещения устройств системы автоматизации процесса ПРК

Сбор данных от первичных преобразователей, расположенных на поверхности рабочей камеры, и управление исполнительными механизмами, такими как реле ленточных нагревателей и клапан-натекатели газов, обеспечивается устройствами сбора данных и управления (УСДУ), отмеченных как УСДУ(1) – УСДУ(5). Пять подобных устройств располагаются равномерно вокруг камеры и обслуживают по 10 секторов РК. Реализовать УСДУ предполагается на устройствах ADAM-5000. Управление УСДУ осуществляется промышленным контроллером. Связь между УСДУ(1) – УСДУ(5) и промышленным контроллером осуществляется по интерфейсу RS-485.

Так же промышленный контроллер ведет управление источником питания тлеющего разряда (ИПТР). Мостовая схема ИПТР управляется контроллером управления источником питания тлеющего разряда.

На рис. 2.8 показана структура комплекса технических средств системы автоматизации процесса ПРК. Комплекс технических средств системы автоматизации процесса ПРК состоит из 2-х уровней. На втором уровне находится промышленный контроллер управления процессом подготовки РК. Контроллер построен на базе ЦПУ PCA-6751. Связь контроллера с устройствами первого уровня осуществляется через модуль связи PCL-746+. PCL-746+ связан по интерфейсу RS-485 с УСДУ(1) – УСДУ(5).

Рассмотрим состав УСДУ(1) – УСДУ(5) более подробно. УСДУ построено на базе ЦПУ ADAM-5000. В своем составе имеет три модуля ввода сигналов с термопар ADAM5018, модуль ADAM-5056 S-A для управления реле ленточных нагревателей, модуль дискретного ввода для связи контроллера с датчиками тока и модуль ADAM-5017H, который обеспечивает ввод аналоговых сигналов с датчиков давления. В состав УСДУ(5) добавлен дополнительный модуль ADAM-5056 S-A для управления клапан-натекателем карборана и включением прогревочного элемента баллона с карбораном, а так же для управления газонапускным оборудованием.

Модуль связи PCL-746+ также обеспечивает связь с контроллером управления выпрямительным устройством (ВУ1-ВУ3). Контроллер построен на базе ЦПУ РСМ-3335. Управление мостовыми схемами выполняется с использованием 2 модулей дискретного ввода-вывода РСМ-3730. Для измерения выходных параметров ВУ1-ВУ3 используется модуль АЦП общего назначения РСМ-3718.

Необходимо отметить, что применение модульной системы построения УСДУ дает возможность гибкого подбора необходимых модулей контроля и управления для каждого из устройств, тем самым повышая технико-экономические показатели системы в целом.

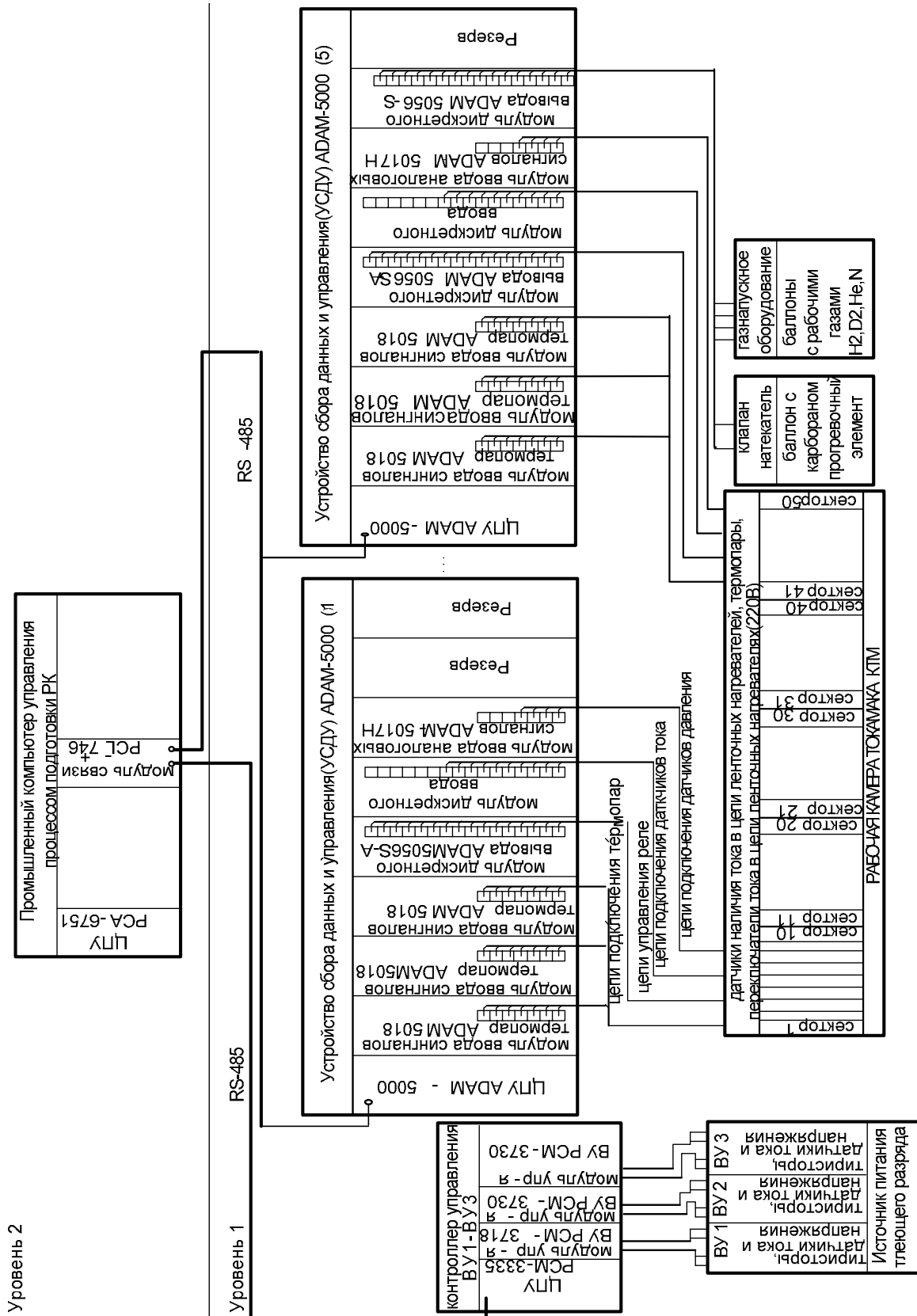


Рис. 2.8. Структура комплекса технических средств системы автоматизации процесса ППК

Заказная спецификация на элементы системы автоматизации представлена в табл. 2.2.

Таблица 2.2.

*Заказная спецификация*

Устройство	Наименование	Кол-во	Производитель
Промышленный контроллер управления процессом подготовки ПРК	ЦПУ PCA-6751	1	Advantech
	Модуль связи PCL-746+	1	Advantech
	ЦПУ ADAM-5000	5	Advantech
Устройство сбора данных и управления	модуль ввода сигнала термопар ADAM-5018	15	Advantech
	модуль дискретного ввода ADAM-5065S-A	6	Advantech
	модуль ввода аналоговых сигналов ADAM-5017	1	Advantech
Контроллер управления ВУ1-ВУ3	ЦПУ PCM-3335	1	Advantech
	модуль управления PCM-3718	3	Advantech

### **2.9. Разработка эскизов форм отображения информации на пульте оператора-технолога ПСУ процессом ПРК**

Пользовательский интерфейс операторской станции системы подготовки рабочей камеры содержит узлы систем нагрева камеры, ее очистки и боронизации в виде графических мнемосхем с представлением их основных параметров (рис. 2.9). Пользовательский интерфейс данной системы отражает посекторное разделение камеры КТМ, причем каждый сектор камеры на экране представляет собой многоцветный индикатор, цвет которого зависит от значения температуры в данном секторе (левый верхний угол экрана). Включение/выключение цепей электронагревателей, включение/выключение источников питания тлеющего разряда в камере, открытие/закрытие клапанов баллонов для напуска газов в рабочую камеру осуществляется нажатием соответствующих графических клавиш, при этом состояние цепей и клапанов индицируется рядом стоящими цветовыми индикаторами. Для задания напряжения на электродах тлеющего разряда необходимо нажать на клавиши задания напряжения и ввести с клавиатуры необходимое напряжение на электродах. Пользовательский интерфейс системы подготовки рабочей камеры ТОКАМАКа КТМ со всей технологической информацией размещен на одном экране, что позволяет оператору быть в курсе всех изменений процесса подготовки камеры.

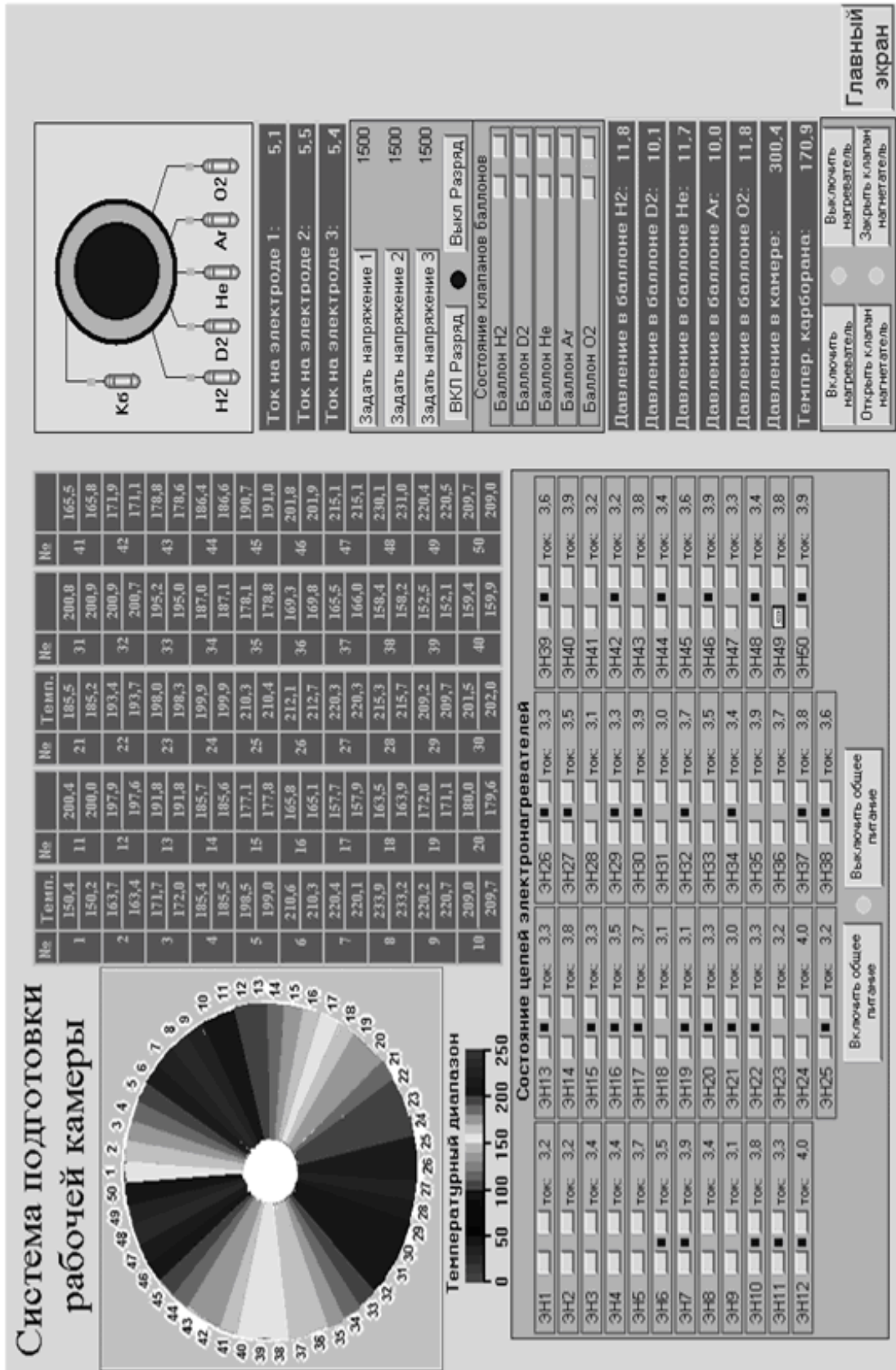


Рис. 2.9. Мнемосхема пульты оператора-технолога

### **3. ПОДСИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ СИСТЕМОЙ ВОДЯНОГО ОХЛАЖДЕНИЯ (СВО)**

#### **3.1. Описание автоматизируемых функций**

Система водяного охлаждения КТМ предназначена для отвода выделяющегося тепла от обмоток электромагнитной системы термоядерной установки, насосов системы высоковакуумной откачки, узлов системы дополнительного высокочастотного нагрева и другой аппаратуры. Данная система должна работать по замкнутой схеме и выполнять следующие основные функции:

- фильтрацию и наполнение системы деминерализованной, деоксидированной водой с высоким удельным электрическим сопротивлением, низким содержанием ионов  $\text{Ca}^{+2}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{HCO}_3^-$  и т. д.;
- отвод тепла от технологического и диагностического оборудования КТМ;
- отвод тепловой энергии от контуров охлаждения посредством теплообменников-холодильников с использованием в качестве хладагента «местной» воды;
- непрерывную фильтрацию воды, циркулирующей в замкнутых контурах, и контроль ее удельного электрического сопротивления при всех последующих рабочих операциях;
- обеспечение минимального количества кислорода, растворенного в воде, поступающей в систему.

Для обеспечения эффективной работы подсистемы водяного охлаждения узлов и агрегатов КТМ целесообразно использовать систему автоматизации, способную функционировать в условиях изменения параметров потребления тепловой энергии и воды узлами КТМ в широком диапазоне, при возникновении аварий на оборудовании и других экстремальных ситуациях.

#### **3.2. Описание функциональной схемы автоматизации системы СВО**

С функциональной точки зрения система водяного охлаждения может быть разделена на следующие взаимосвязанные подсистемы, реализующие эти функции: водоподготовки, искусственного охлаждения циркулирующего в системе теплоносителя, охлаждения узлов и аппаратуры КТМ.

Подсистема водоподготовки состоит из участка нагнетания «местной» воды, ее подготовки и подачи деминерализованной воды и участка (петли) доводки деминерализованной воды. Участок нагнетания, подго-



товки и подачи деминерализованной воды обеспечивает нагнетание неочищенной воды из местных «источников», ее подготовку, первоначальную заливку, промывку, вторичное заполнение системы, последующие хранение подготовленной воды в накопительной емкости (емкостях) и необходимую в работе подпитку. На этом участке нагнетаемая питьевая («местная») вода подвергается фильтрации, очистке в ионообменной колонке, удалению кислорода и другой обработке с тем, чтобы она отвечала необходимым требованиям по содержанию макро-частиц, продуктов активации солей, растворяемых газов и в особенности кислорода и двуокиси углерода, по удельному электрическому сопротивлению и другим параметрам. Оборудование и приборы, необходимые для приготовления и подачи деминерализованной воды обычно располагаются в отдельном здании. Деминерализованная и обескислороженная вода готовится, хранится, а затем доставляется от здания ее подготовки в здание комплекса КТМ.

Основными контролируемыми и управляемыми технологическими параметрами подсистемы водоподготовки являются параметры, характеризующие качество используемой для охлаждения воды, ее количество (уровень) в накопительной емкости, давление и расход на тракте нагнетания «местной» воды и в тракте подачи деминерализованной воды. Наряду с этим должны подлежать контролю температура и момент на валу нагнетающих (питательных) и циркуляционных насосов. Сигнализации должны подлежать отклонения от норм параметров, характеризующих качество охлаждающей воды, уровня ее в накопительных емкостях, давления на трактах нагнетания и подачи, температуры насосов (их подшипников), моментов нагрузок на их валах, а также состояния данных насосов («Вкл.»/«Выкл.»). Управление на данном этапе сводится в основном к автоматизации операций включения и отключения насосных агрегатов, в том числе и при возникновении предаварийных и аварийных ситуаций.

Рассмотрим более подробно вопросы автоматизации подсистемы принудительного охлаждения узлов и агрегатов КТМ. Проведенный анализ показывает, что основными контролируемыми и управляемыми технологическими параметрами в данной подсистеме должны быть температура и расход теплоносителя на выходе из каналов охлаждения и его давление в подводящем коллекторе, а также температура наиболее ответственных точек контролируемых температурных полей (места болтовых соединений обмоток, температура охлаждаемых узлов высоковакуумных насосов, и ВЧ-генераторов). Данная подсистема должна обеспечивать координацию расходов охлаждающей воды с разрядными

импульсами КТМ и выработку деблокирующих сигналов для системы аварийной защиты о готовности подсистемы управления водяным охлаждением по параметрам расходов и температуре охлаждающей воды и узлов к пуску КТМ.

С отводящего коллектора вода отводится в здание водоподготовки на встречноточный теплообменник. На входе и выходе теплообменника устанавливаются датчики для измерения температуры теплоносителя. Для измерения количества отводимой теплоты нужно поставить в контуре охлаждения расходомер. Охлаждение выполняется при помощи «местной» грубо очищенной воды, которая в свою очередь требует сброса тепла. Для этой цели может быть использован воздушный охладитель. Управление температурой «местной» воды на выходе воздушного охладителя осуществляется позиционно переключением количества работающих воздушных вентиляторов.

Функциональная схема автоматизации системы водяного охлаждения КТМ представлена на рис. 3.1.

Сводная таблица измеряемых параметров и характеристик сигналов датчиков подсистемы управления СВО приведена ниже.

Таблица 3.1

*Изменяемые параметры и характеристики сигналов датчиков подсистемы управления СВО*

№	Изменяемый параметр	Количество	Диапазон измерения	Динамические характеристики, Гц	Допустимая основная погрешность %	Тип первичного преобразователя
1	Проводимость воды	1	0–1 мкСм/см	0,01	<3	Кондуктометр КЭС-1 (НПО «Аврора»)
2	Концентрация растворенного кислорода в воде	1	0–20 мг/кг	0,01	<2,5	Термооксиметр Экотест-2000 (НПП «Эконикс»)
3	Уровень	3	0–3 м	1	<0,5	Метран-43ДГ
4	Температура воды в баке	2	0–100°C	1	<1	ТСМ
5	Расход воды	2	0–70 м <sup>3</sup> /ч	100	<1	Метран-300ПР
6	Расход воды в каналах охлаждения	52	0–1,4 м <sup>3</sup> /ч	100	<1	Метран-300ПР
7	Температура воды в каналах охлаждения и отводящем коллекторе	53	0–100 °C	5	<1	ТСМ

№	Измеряемый параметр	Количество	Диапазон измерения	Динамические характеристики, Гц	Допустимая основная погрешность %	Тип первичного преобразователя
8	Давление в коллекторах	2	4-105 Па	5	<0,5	Метран-22ДИ (Сапфир-22ДИ)
9	Температура болтовых соединений обмоток ЭМС	314	0-300 °С	100	<1	ТХК
10	Температура вакуумных насосов	8	0-300 °С	100	<1	ТХК
11	Температура ВЧ генераторов	4	0-300 °С	100	<1	ТХК

Система водяного охлаждения КТМ с точки зрения ее автоматизации представляет собой объект с пространственно распределенными параметрами. В связи с этим, а также учитывая характер и разнообразие измеряемых и контролируемых величин, необходимость использования информации о них в целом в системе автоматизации экспериментов, и то, что основные параметры, определяющие в данной системе технологический процесс, являются достаточно медленно меняющимися функциями времени, представляется наиболее целесообразным строить автоматизированную систему по принципу иерархической распределенной АСУТП с использованием на нижнем уровне микропроцессорных контроллеров и промышленного компьютера – на втором уровне, связанных между собой в локальную вычислительную сеть. В данном случае в качестве контроллеров могут быть использованы микропроцессорные контроллеры типа ADAM-5000, а в качестве промышленного компьютера – компьютер IPC-610. При этом контроллеры располагаются непосредственно вблизи технологического оборудования. На данных уровнях производится первичная обработка информации и выработка управляющих воздействий и заданий на их выполнение. Здесь следует отметить, что территориальное распределение технологического оборудования подсистемы управления СВО и подсистемы подготовки рабочей камеры позволяет реализовать их функции в рамках единого комплекса контроллеров первого уровня. В свою очередь третий (верхний) уровень СУТП должен представлять собой единый пульт оператора, управляющего подсистемами вакуумно-технологической подготовки. Он может быть реализован на персональном компьютере IBM PC/AT с соответствующим терминальным оборудованием. На данный уровень возлагается выполнение основной обработки и визуализации информации, относящейся и к системе водяного охлаждения в частности.



Возможность управления всем технологическим оборудованием системы водяного охлаждения с пульта оператора технологической пультовой не должна исключать возможность местного контроля и управления системой в целом и отдельным ее технологическим оборудованием. Такая необходимость возникает при профилактике оборудования, при отладке отдельных устройств, при выполнении пусковых работ. В этих случаях контроль и управление оборудованием децентрализованы, и все необходимые операции производит неоперативный персонал с использованием технологических средств, расположенных на I и II уровнях автоматизированной системы.

В этом качестве могут быть применены пульт промышленного компьютера или мобильный операторский пульт. При этом должна быть предусмотрена возможность подключения некоторых измерительных каналов и управления отдельным оборудованием непосредственно со второго уровня системы управления. Структурно-функциональная схема предлагаемой подсистемы управления представлена на рис. 3.2.

Пользовательский интерфейс операторской станции системы водоохлаждения содержит изображение основных узлов КТМ в виде элементов графических мнемосхем с представлением их основных параметров (рис. 3.3). Информация о протекании процесса охлаждения элементов ТОКАМАКа КТМ отображается путем использования цветных графических мнемосхем, анимационных объектов и всплывающего пояснительного текста, который появляется при нахождении указателя над каким-либо объектом.

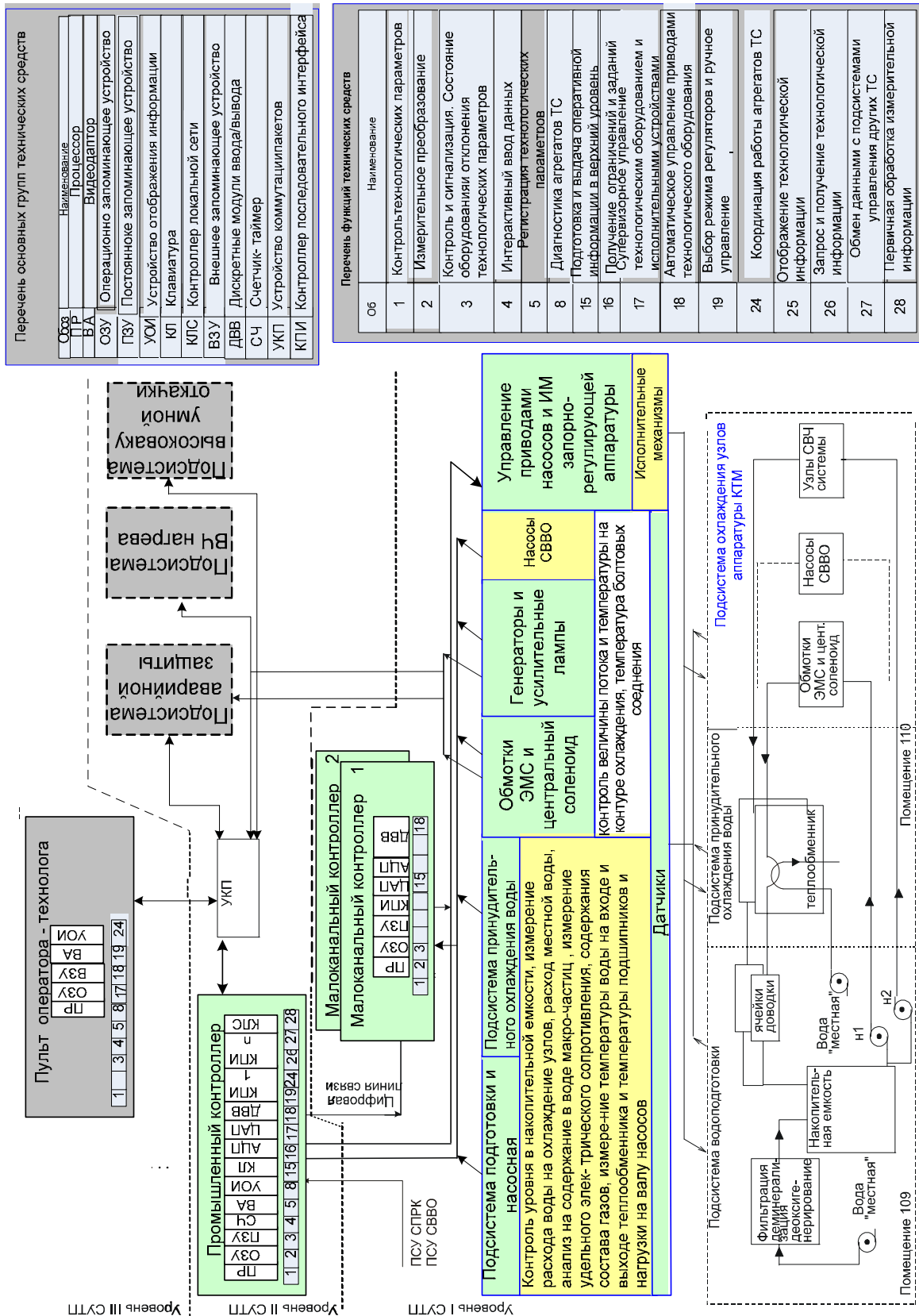


Рис. 3.2. Структурно-функциональная схема системы водяного охлаждения КТМ

# Система водоохлаждения

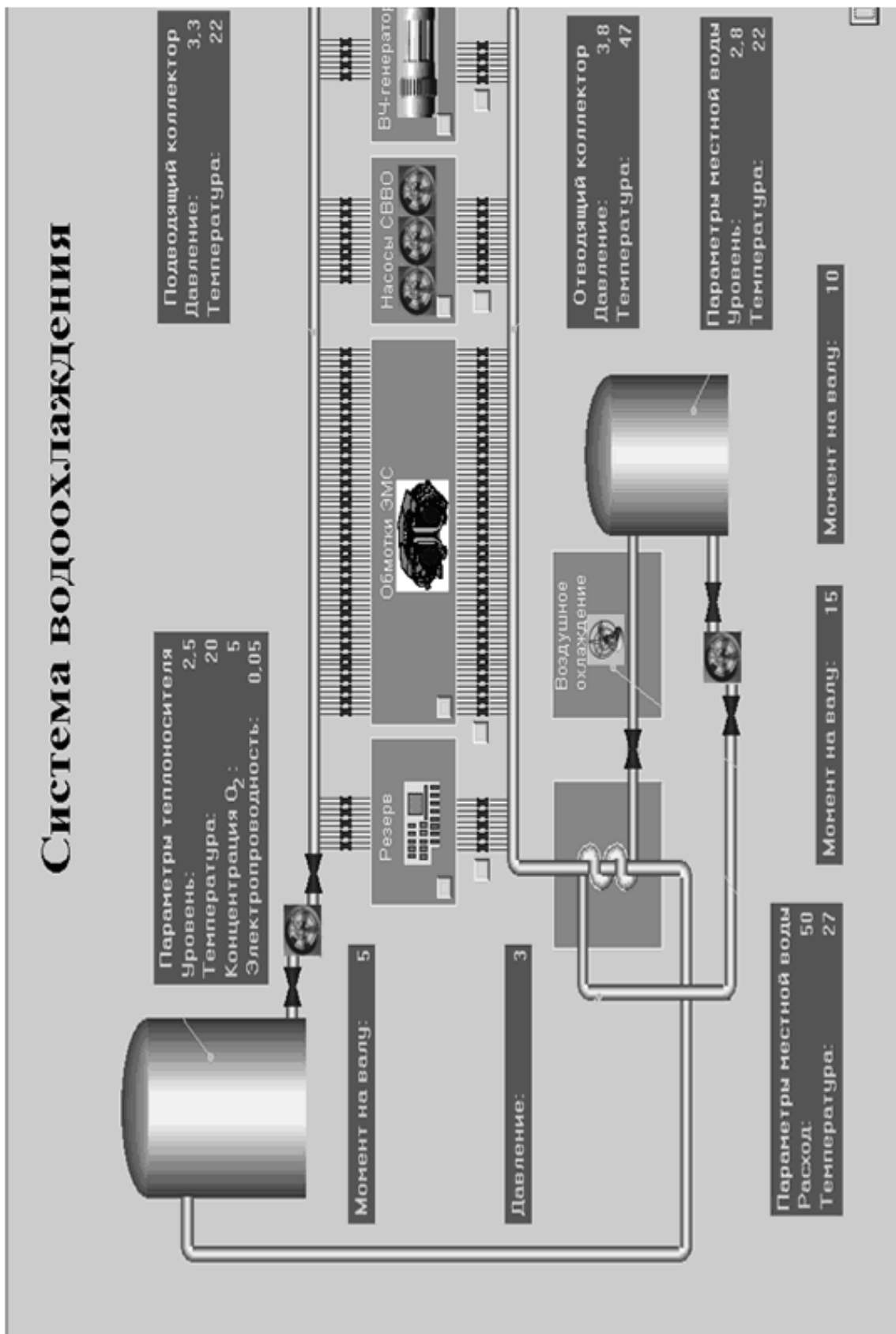


Рис. 3.3. Мнемосхема подсистемы водяного охлаждения

### 3.3. Разработка эскизов форм отображения информации на пульте оператора-технолога ПСУ СВО

Большая часть технологической информации параметров контролируемого узла данной системы располагается на дополнительных экранах, для перехода на которые достаточно нажать кнопку, находящуюся вблизи данного узла (рис. 3.4). При этом на появившемся дополнительном экране в виде графиков (рис. 3.5) или в виде таблицы будут отображены необходимые параметры (температура, расход в точках контроля) и их численные значения (рис. 3.6).

#### Переход на экран параметров

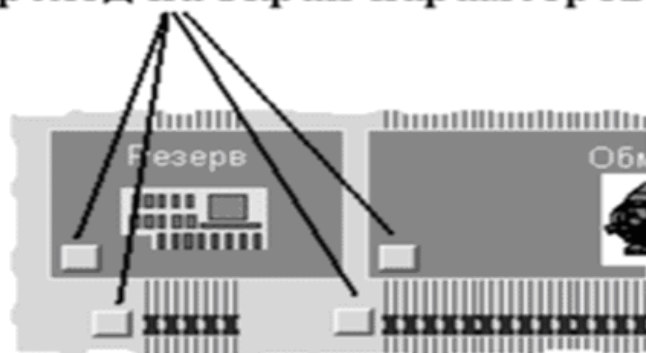


Рис. 3.4. Переходы на экраны параметров



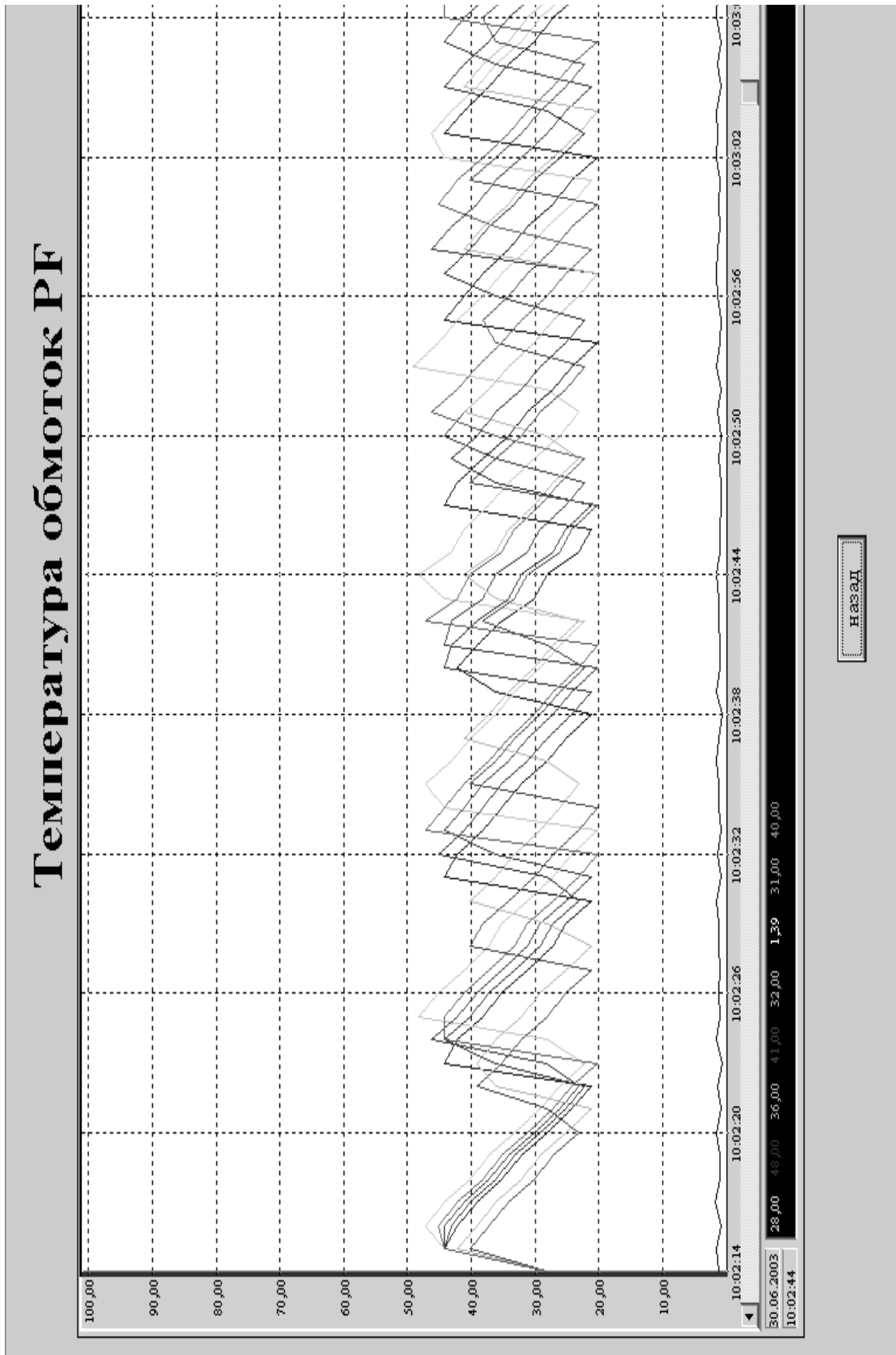


Рис. 3.5. Экран параметров обмоток

## Параметры обмоток

Контрольные точки	Параметры	Значение	Контрольные точки	Параметры	Значение	Контрольные точки	Параметры	Значение
PF1	Расход Температура	0,6 27,0	TF1	Расход Температура	1,2 23,0	TF13	Расход Температура	1,5 27,0
PF2	Расход Температура	0,9 23,0	TF2	Расход Температура	1,2 33,0	TF14	Расход Температура	1,2 21,0
PF3	Расход Температура	1,4 41,0	TF3	Расход Температура	1,4 29,0	TF15	Расход Температура	1,1 28,0
PF4	Расход Температура	1,0 21,0	TF4	Расход Температура	0,8 21,0	TF16	Расход Температура	1,4 41,0
PF5	Расход Температура	0,5 21,0	TF5	Расход Температура	0,6 27,0	TF17	Расход Температура	1,3 43,0
PF6	Расход Температура	0,8 47,0	TF6	Расход Температура	0,7 23,0	TF18	Расход Температура	0,5 23,0
PF7	Расход Температура	0,9 20,0	TF7	Расход Температура	1,5 41,0	TF19	Расход Температура	0,9 33,0
PF8	Расход Температура	1,1 28,0	TF8	Расход Температура	0,7 21,0	TF20	Расход Температура	1,3 29,0
OH1	Расход Температура	1,3 27,0	TF9	Расход Температура	1,4 21,0	HFC+	Расход Температура	1,0 43,0
OH2	Расход Температура	1,2 21,0	TF10	Расход Температура	1,1 47,0	HFC-	Расход Температура	1,3 23,0
OH3	Расход Температура	1,3 28,0	TF11	Расход Температура	1,0 20,0			
OH4	Расход Температура	0,8 41,0	TF12	Расход Температура	1,2 28,0			

кв.ад.

Обмотки TF

Обмотки HFC

Обмотки PF

Обмотки OH

Рис. 3.6. Экран параметров обмоток

## 4. ПОДСИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ПОДВИЖНЫМ ДИВЕРТОРНЫМ И ШЛЮЗОВЫМ УСТРОЙСТВАМИ (ПДШУ)

### 4.1. Анализ диверторного устройства и шлюзовой камеры как объекта автоматизации

Диверторное устройство является частью ТОКАМАКа КТМ и представляет собой систему, предназначенную для размещения, закрепления и позиционирования элементов, воспринимающих тепловой и корпускулярный поток от плазмы (см. рис. 4.1.1).

Диверторное устройство находится внутри вакуумного объема установки (кроме электроприводов диверторного стола, которые расположены вне вакуумного объема рабочей камеры).

Диверторное устройство служит для размещения сменных элементов, воспринимающих тепловой и корпускулярный потоки со стороны плазмы, обеспечивает их позиционирование по вертикали в диапазоне координат от  $Z = 200$  мм до  $Z = 990$  мм, замену всех этих элементов через один загрузочный шлюз.

Таблица 4.1

*Основные технические характеристики диверторного устройства*

№	Наименование	Обозначение и размерность	Величина
1	Количество сменных элементов	$n$	24
2	Внутренний радиус блока элементов	$r$ (mm)	540
3	Наружный радиус блока элементов	$R$ (mm)	1015
4	Ширина сменного блока (max)	$B$ (mm)	230
5	Ход вертикальной подачи	$h$ (mm)	790
6	Угол поворота блока элементов в горизонтальной плоскости	$\theta$	360
7	Количество полномасштабных циклов разряда плазмы	-----	$2 \cdot 10^4$
8	Количество срывов тока плазмы, которое должно выдерживать диверторное устройство	-----	$10^4$
9	Периодичность работы	циклов/час	5

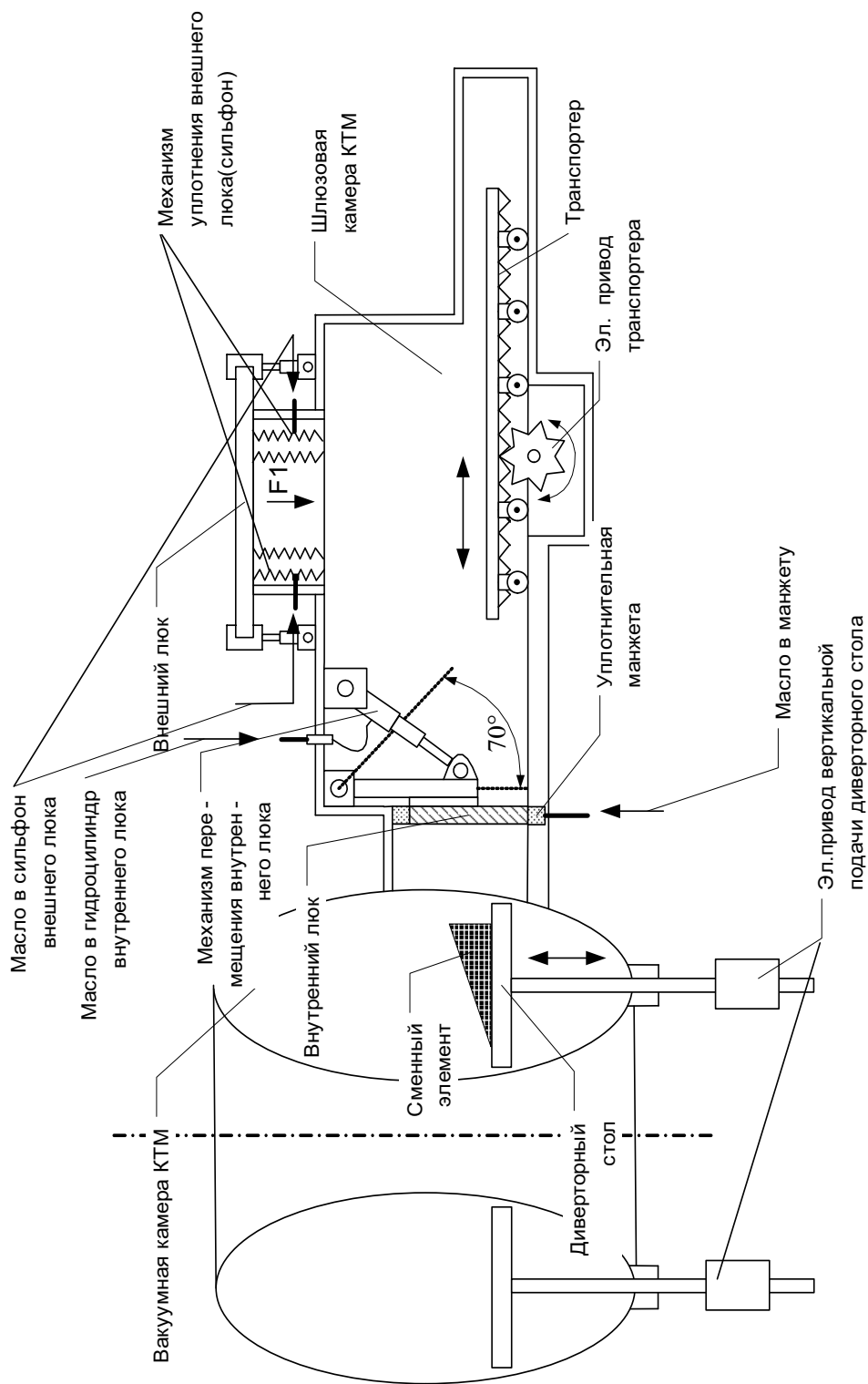


Рис. 4.1.1. Технологическая схема СПДШУ ТОКАМАКа КТМ

Сменные элементы диверторного устройства подаются в зону загрузки/выгрузки за счет хода вертикальной подачи и поворота блока сменных элементов в горизонтальной плоскости.

Вертикальная подача блока сменных элементов осуществляется при помощи четырех шаговых электромеханических приводов (подъемные приводы), а поворот блока сменных элементов – посредством двух аналогичных шаговых электромеханических приводов (вращающие приводы, на рис. 4.1.1 не показаны). Приводы диверторного устройства находятся вне вакуумного объема установки.

Развакуумирование основного объема камеры установки во время циклов загрузки-выгрузки не допускается благодаря наличию двух герметично закрывающихся люков. Внешний люк представляет собой съёмную крышку, которая снимается и устанавливается на внешний люк вручную. Сильфон, который также можно видеть на рис. 4.1.1, прижимает крышку к люку, обеспечивая тем самым герметичность стыка. Внутренний люк имеет механизм дистанционного открытия/закрытия (на рис. 4.1.1 обозначен как механизм перемещения внутреннего люка). Герметичность закрытия внутреннего люка обеспечивается уплотнительной манжетой, которая представляет собой полый тор, в поперечном сечении которого получается неправильный прямоугольник. При нагнетании масла в манжету, происходит её расширение в радиальном направлении, благодаря чему герметично обжимается внутренний люк. Для открытия внутреннего люка давление в манжете сбрасывается.

Внутри шлюза находится загрузочное устройство (транспортёр) с одной степенью свободы. Транспортёр представляет собой подвижную консоль с роликами, перемещающуюся в область загрузки/выгрузки вакуумной камеры КТМ и обратно по направляющим. Движение транспортёра осуществляется ручным приводом.

Принцип работы электромеханического привода следующий (см. рис. 4.1.2). Электромагнит перемещает ферромагнитный сердечник, который через тягу и толкатель приводит в движение храповое колесо. Храповое колесо закреплено на втулке, сидящей на ведущем валу. На той же втулке находится второе храповое колесо, которое приводится в движение второй группой: толкатель, тяга, магнит. Соединение вал-втулка представляет собой винтовую пару. Поскольку зубья храповых колес направлены в разные стороны и электромагниты расположены с разных сторон относительно вала, то один магнит вращает втулку в одну сторону, а другой магнит – в противоположную, обеспечивая, таким образом, движение вала вверх/вниз.

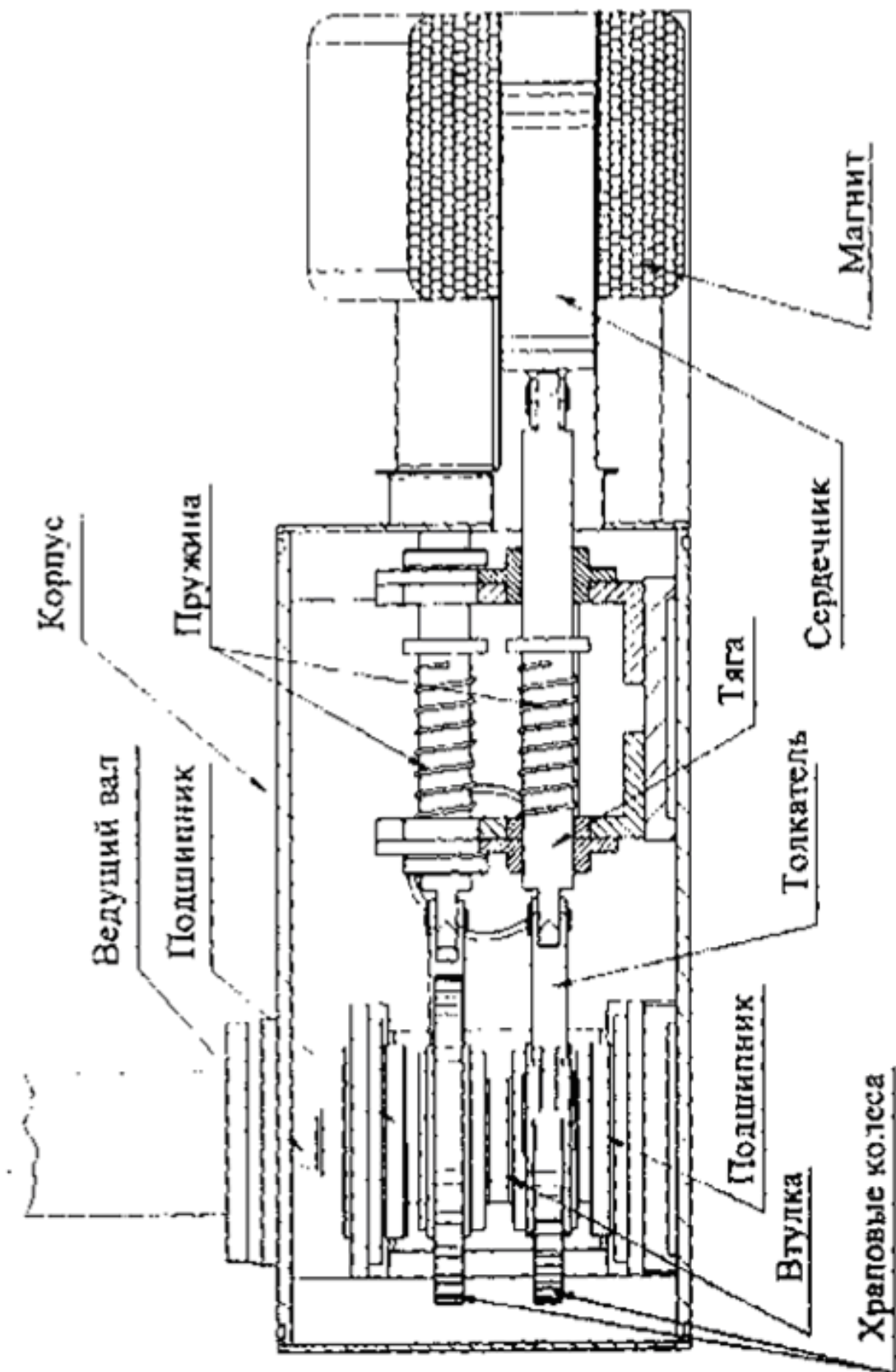


Рис. 4.1.2. Конструкция электромеханического привода

Во вращающем приводе вал и втулка имеют между собой скользящее шпоночное соединение, что позволяет им оставаться в зацеплении при вертикальном перемещении диверторного стола.

Втулка с храповыми колесами закреплена в подшипниках скольжения с графитовыми или бронзовыми вкладышами.

## **4.2. Разработка общего алгоритма функционирования подсистемы управления ПДШУ ТОКАМАКа КТМ**

### **4.2.1. Описание общего алгоритма управления**

Блок-схема общего алгоритма функционирования шлюзовой камеры и диверторного устройства ТОКАМАКа КТМ представлен на рис. 4.2.1.

Суть предложенного алгоритма – это параллельное выполнение операций по поддержанию технологического регламента системы и операций по загрузке/выгрузке сменных элементов, а также операций по перемещению диверторного стола на заданный уровень.

Укрупнённо данный алгоритм можно представить состоящим из семи основных блоков.

Первая функция – это функция подготовки системы к запуску. Она включает в себя блоки 1 и 2 и подразумевает ввод общих параметров системы с внешнего накопителя памяти либо из ПЗУ и анализ её готовности к старту. Блоки 1 и 2 выполняются автоматически при включении электропитания подсистемы управления.

После выполнения блоков 1 и 2 подсистема СПДШУ переходит в состояние ожидания ввода команды.

Вторая функция – функция, выполняющая вывод системы в рабочий режим, на схеме представлена блоком 8. Данная функция запускается по команде оператора «Старт».

В процессе вывода системы в рабочий режим одновременно запускается блок 9, который осуществляет функцию поддержания системы в рамках технологического регламента, а также сбор и хранение информации об этих параметрах в ОЗУ подсистемы управления.

Блоки 3–6 запускаются соответствующими командами оператора и выполняют непосредственно функции загрузки/выгрузки сменных элементов. Причем блок 3 осуществляет только загрузку, блок 5 – только выгрузку, блок 4 – выгрузку с последующей загрузкой сменного элемента, а блок 6 осуществляет перемещение стола на заданный уровень по координате  $Z$  и вращение стола. Соответствующие блок-схемы алгоритмов перемещения стола по вертикали и его вращения приведены на рисунке в приложениях КТМ.03.001.019 и КТМ.03.001.020.

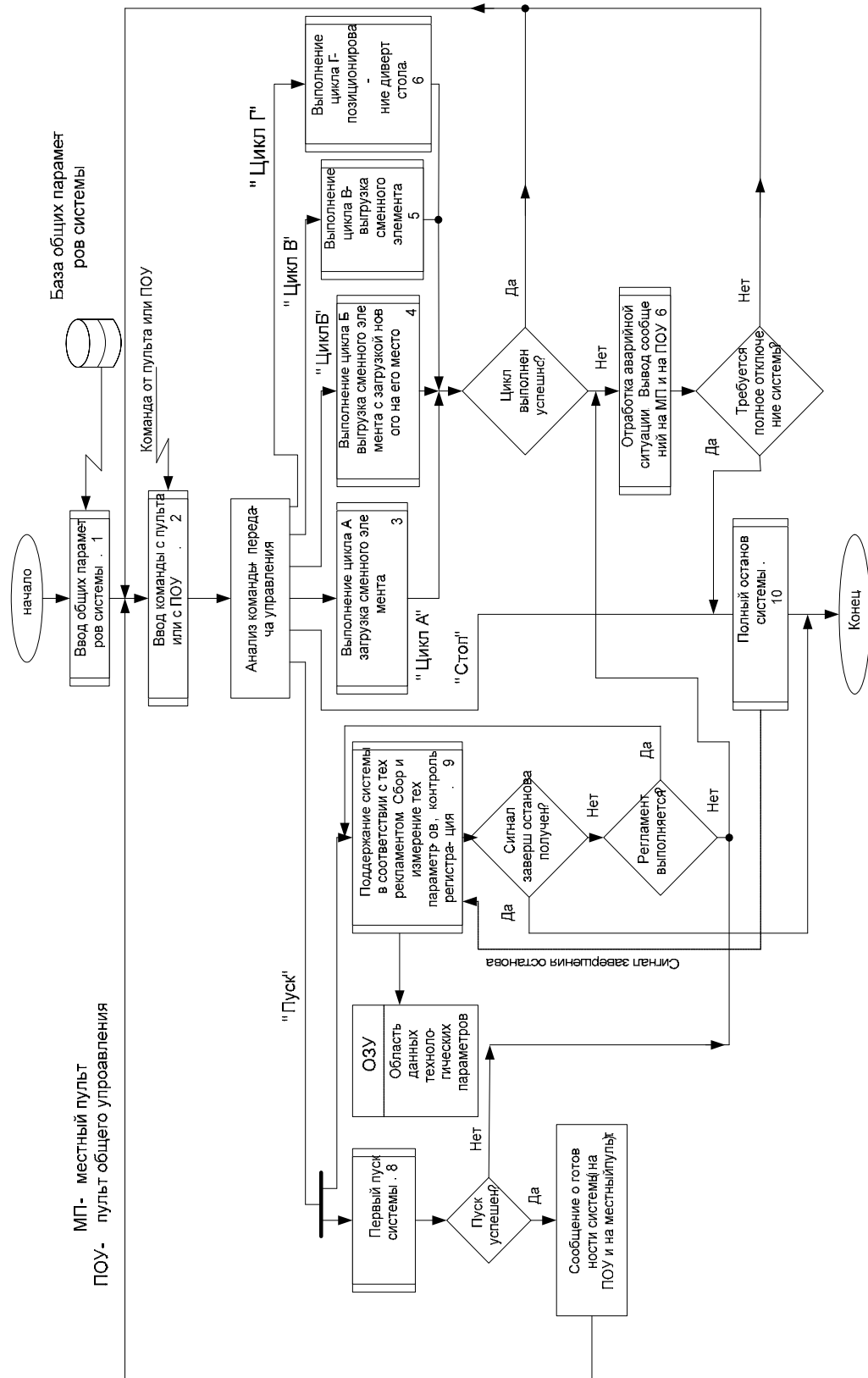


Рис. 4.2.1. Общий алгоритм функционирования подсистемы управления ПДШУ



### 4.2.2. Алгоритм операции выгрузки сменного элемента с последующей загрузкой нового элемента

Алгоритм операции выгрузки сменного элемента с последующей загрузкой нового элемента представлен на рис. 4.2.2.

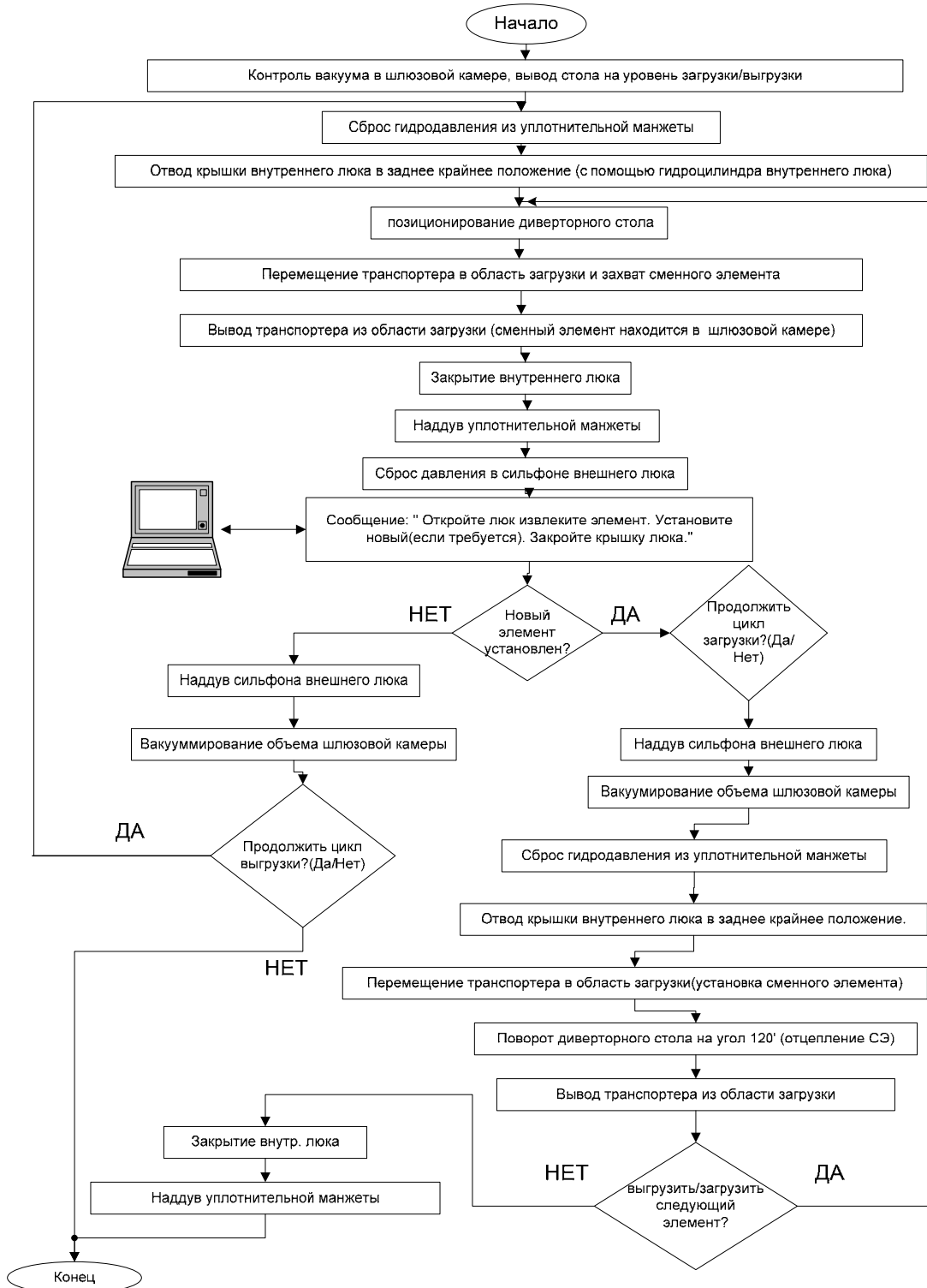


Рис. 4.2.2. Алгоритм операции выгрузки/загрузки сменного элемента

### 4.3. Разработка структурной схемы гидравлического привода шлюзовой камеры

Для надёжного открытия/закрытия люков шлюзовой камеры предлагается использовать автоматизированный гидравлический привод.

**Определение: гидравлический привод** – это самостоятельная установка, состоящая из двигателя (чаще всего электрического), рабочего цилиндра (и др. исполнительных механизмов), насоса для подачи масла в цилиндр, бака для масла, аппаратуры управления и регулирования и трубопроводов.

**Исходными данными к разработке гидропривода являются:**

- количество механизмов, приводимых в движение гидроусилием (в нашем случае это: гидроцилиндр, уплотнительная манжета и сальфон внешнего люка, таким образом, всего 3 шт.);
- максимальное давление на входе исполнительных механизмов (1,8 МПа);
- общий расход масла (не более 10 л/мин).

В общем случае любой гидравлический привод состоит из двух основных блоков – это насосная установка и исполнительная часть гидропривода, между собой эти блоки соединены трубопроводом. В нашем случае исполнительная часть будет включать в себя три механизма, которые приводятся в движение за счет движения потока масла. Рассмотрим каждый из них.

1. Гидроцилиндр, приводящий в движение внутренний люк, это – реверсивный гидроцилиндр, обозначение в спецификации 1–50 × 250 МН 2255-61 (см. ссылку [9]), давление по заданию 1,8 МПа.

2. Сальфон наружного люка, который осуществляет уплотнение наружного люка за счет нагнетания масла в его внутренний объем. Масло нагнетается/сливается через два концевых штуцера (чертеж КТМ. 02.0103.0000. СБ «Горловина»). Давление масла, по заданию 0,6 МПа.

3. Мембрана (уплотнительная манжета), которая осуществляет уплотнение внутреннего люка за счет нагнетания масла в его внутренний объем. Масло нагнетается/сливается через два концевых штуцера (чертеж КТМ. 02.0101.0100. СБ «Горловина внутренняя»). Давление масла, по заданию 0,6 МПа.

Необходимо помнить, что принцип действия последних двух механизмов и реализация системы нагнетания и слива масла аналогичны используемой для неревверсивных гидравлических цилиндров. Поэтому исполнительная часть гидропривода была представлена, как показано на рис. 4.3.

На рисунке стрелками показано направление потоков масла в гидроприводе.

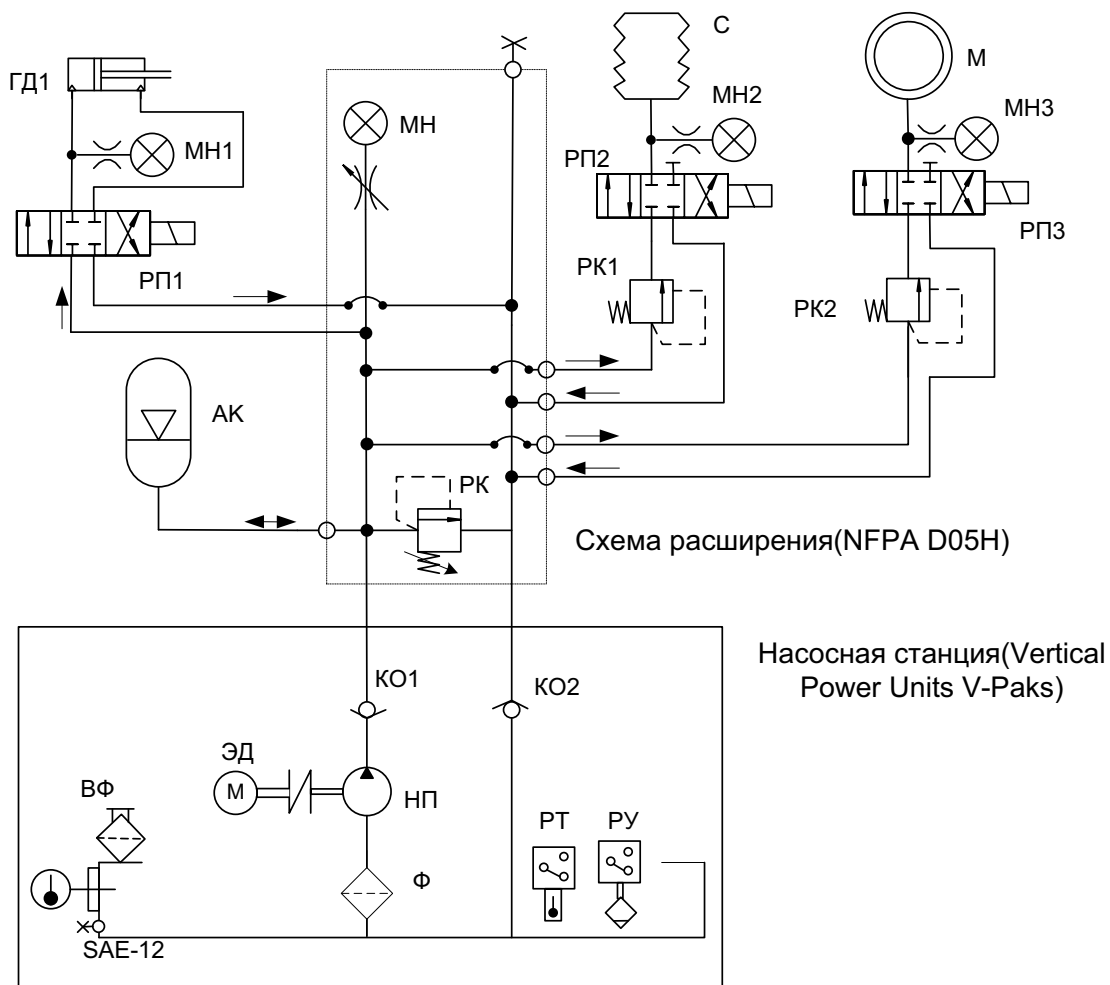


Рис. 4.3. Структурная схема гидравлического привода шлюзовой камеры КТМ:

- ГД1 – гидроцилиндр внутреннего люка; М – мембрана внутреннего люка;
- С – сильфон внешнего люка; РК, РК1, РК2 – редукционные клапана;
- МН, МН1–МН3 – манометры; РП1–РП3 – распределители потоков;
- АК – аккумулятор; ЭД – электродвигатель; Н – насос;
- КО1, КО2 – клапан обратный; ВФ – воздушный фильтр;
- РТ – реле температуры; РУ – реле уровня; Ф – фильтр

#### 4.3.1. Описание работы исполнительной части гидропривода

Пусть насосная установка обеспечивает давление масляного потока на входе исполнительной части в 1,8 МПа. Далее поток масла разбивается на три параллельных потока. Коммутация потока масла на каждой из ветвей осуществляется отдельным распределителем потока РП1–РП3. В качестве распределителей потока выбраны устройства стандарта NG6. В цепях М и С (мембрана внутреннего люка и сильфон) после распреде-

лителей потоков РП2 и РП3 установлены редукционные клапаны, понижающие давление масла до 0,6 МПа. Давление в цепях ГД1, М и С контролируются манометрами МН1-МН3.

Таким образом, исполнительная часть гидропривода представляет собой трехконтурную схему. Направлением движения масла в каждом контуре управляет соответствующий распределитель потока. Все три распределителя трехпозиционные. Прямое перемещение цилиндра, наддув сильфона и манжеты происходит при нахождении золотников распределителей в крайнем левом положении (см. рис. 4.3). Обратное перемещение поршня гидроцилиндра внутреннего люка, сброс давления в манжете и сильфоне осуществляется за счет переключения РП1, РП2 и РП3 в крайнее правое положение. Система находится в статическом состоянии (в исполнительных цепях не происходит изменения давления) при условии, что золотники распределителей потоков находятся в среднем положении согласно схеме. Золотники перемещаются за счет электромагнитов, установленных на правом торце каждого из распределителей. Сами электромагниты управляются электронной схемой, которая смонтирована на верхней панели распределителя. Распределитель потока оснащён датчиком положения золотника. Распределитель управляется сигналом напряжения  $\pm 10\text{В}$ , выдаёт сигнал о положении золотника также в диапазоне  $\pm 10\text{В}$ , имеет входы питания (0, +24 В) и один выход, предназначенный для заземления устройства.

#### **4.3.2. Описание насосной установки, выбор элементов гидропривода**

В ходе разработки исполнительной части гидропривода и анализа конструкторской документации на шлюзовую камеру были сформулированы основные требования, предъявляемые к насосной установке при её выборе. Перечислим эти требования:

- номинальный поток, обеспечиваемый двигателем, не более 10 л/мин;
- мощность электродвигателя – 1 кВт;
- емкость сливного бака не менее 50 л;
- давление масла, обеспечиваемое насосом, на входе исполнительных механизмов –  $0,6 \div 1,8$  МПа.

Анализ мирового рынка гидроавтоматики позволил выбрать насосную установку наиболее полно удовлетворяющую перечисленным требованиям. Была выбрана установка фирмы Parker модели Vertical Power Unit P-Paks (номер каталога NY 13-1552-001/NA EU). Также была выбрана панель расширения, необходимая для сопряжения насосной установки и исполнительной части гидропривода. Так как все три исполнительных механизма гидропривода являются зажимными устройствами,

то для того чтобы продлить рабочий ресурс насоса насосной установки в схему необходимо включить аккумулятор 3.

Полная структурная схема гидропривода представлена на рис. 4.3. В соответствии с этой схемой гидропривод работает следующим образом: масло от нерегулируемого пластинчатого насоса Н, приводимого в движение электродвигателем ЭД, через фильтр Ф и обратный клапан КО1, исключающий возможность слива масла из гидропривода при неработающем насосе, поступает в исполнительную часть под давлением, определяемым настройкой разгрузочного клапана РК, этот же поток масла заряжает аккумулятор АК. После того как давление в системе достигает требуемой величины и полностью выполнены алгоритмы загрузки/выгрузки сменных элементов, двигатель установки отключается. Ввиду того, что в системе присутствуют естественные утечки масла (через сальники распределителей потоков), давление в исполнительной части будет постоянно падать, при переключении же распределителей потоков в крайнее левое положение, существует возможность подпитывать систему от аккумулятора АК без дополнительного включения электродвигателя насосной установки.

При работе системы сливающееся масло из исполнительного блока через подпорный клапан КО2 свободным током поступает в бак.

Давление в напорной линии контролируется манометром МН. В данной установке существует диагностика, которая представлена реле уровня масла в баке насосной установки (РУ) и реле температуры масла (РТ).

#### **4.3.3. Состав точек контроля и управления гидроприводом**

Таким образом, в рассмотренном гидроприводе можно выделить:

- 4 точки контроля давления: МН, МН1 – МН3;
- 3 точки управления распределителями потоков РП1-РП3;
- 3 точки контроля состояния распределителей потока;
- 1 точка управления электродвигателем (вкл./выкл.);
- 2 точки контроля состояния насосной установки: реле температуры, реле уровня.

#### **4.4. Разработка схемы контроля положения диверторного стола при его перемещении в вертикальном и радиальном направлениях**

Схема контроля вертикального и радиального положения диверторного стола представлена на рис. 4.4.

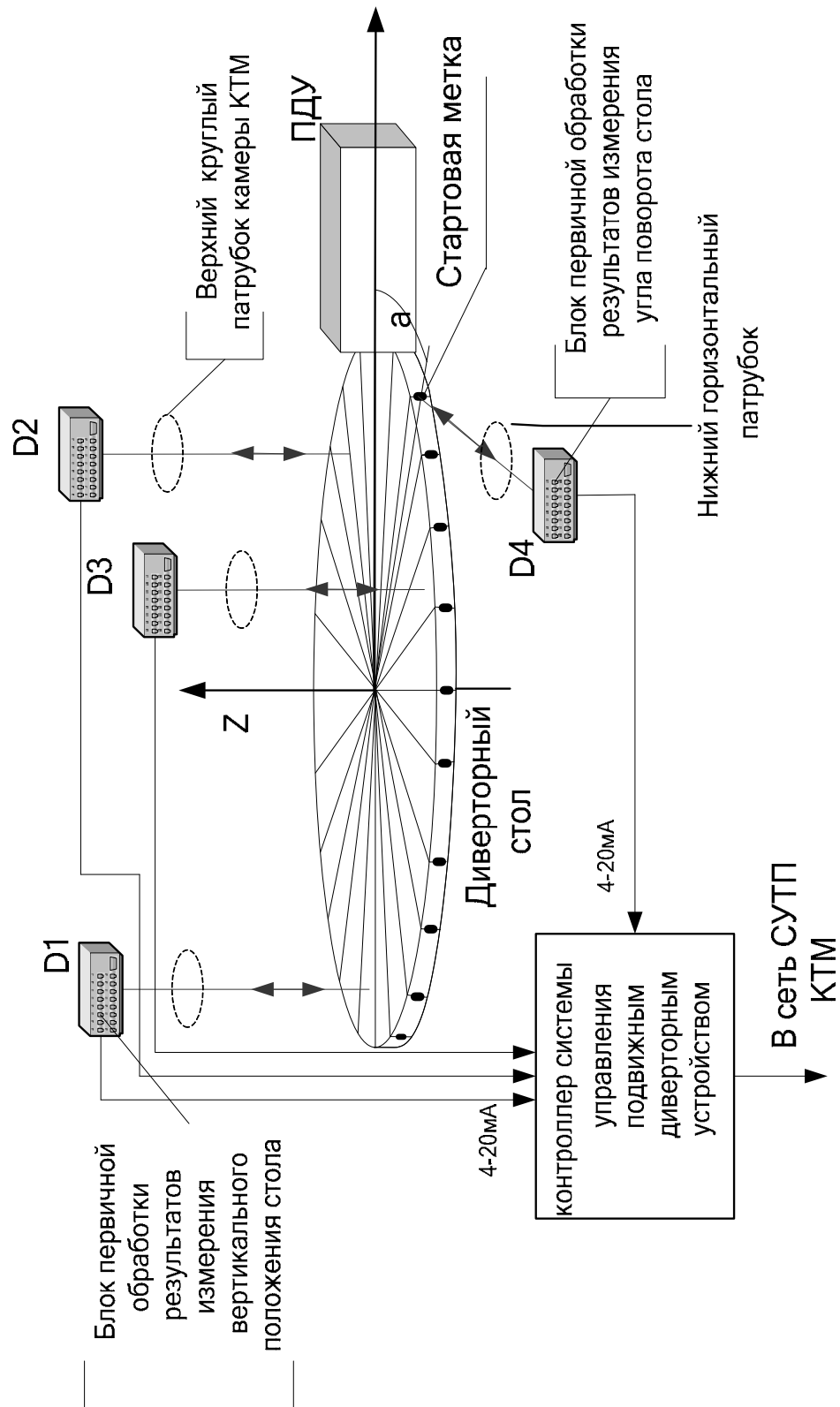


Рис. 4.4. Схема контроля вертикального и радиального положения диверторного стола:  
*D1–D3* – измерительный преобразователь; *D4* – датчик обнаружения меток

Диверторный стол разбивается на сектора, по количеству сменных элементов – 24 шт. Начало каждого сектора маркируется отражающей секторной меткой на торце стола. При наладке системы вводится нумерация секторов путём выставления какого-либо сектора напротив шлюза (в зоне загрузки) и занесения номера сектора единичным значением в ПЗУ контроллера системы управления диверторным столом. При этом метка, попавшая в диапазон видимости датчика D4, регистрируется и отмечается как стартовая.

Таким образом, при вращении диверторного стола в соответствующие моменты времени датчик D4 будет фиксировать секторные метки и в соответствии с этим сигналом контроллер системы будет пересохранять в энергонезависимой памяти номер сектора, расположенного в зоне загрузки/выгрузки.

Выполнение любого цикла загрузки/выгрузки предполагает вертикальное перемещение стола в нулевую координату по оси Z (далее будем называть данную координату «уровнем загрузки») и перемещение стола в тороидальном направлении до тех пор, пока заданный оператором сектор не попадёт в зону загрузки/выгрузки. Вертикальное перемещение стола контролируется тремя блоками измерения положения стола по вертикали. Каждый такой блок представляет собой бесконтактный уровнемер, который сконструирован таким образом, чтобы находиться на некотором удалении от рабочей камеры. Посредством измерения времени прохождения импульсов инфракрасного лазерного излучения устройство определяет расстояние до поверхности стола. Многократно записываемые показания блоков усредняются, формируя на выходе сигнал, соответствующий измеряемому уровню с высокой точностью. Такое количество измерительных преобразователей уровня необходимо для контроля горизонтальности диверторного стола. Тороидальное положение контролируется «блоком контроля тороидального положения стола» – датчик D4.

В качестве бесконтактного уровнемера предложено использовать индикатор уровня и положения лазерного типа Accu-Pulse (фирма производитель Thermo Measure Tech), который имеет следующие технические характеристики:

Диапазон измерения: ..... от 0,2 до 250 м

#### **Характеристики лазера**

Расходимость луча: ..... 5 мрад (0,28°)

Размер пятна: ..... 4 см + (0,005X расстояние в см)

Длина волны лазерного излучения: ..... 905 нм (инфракрасный диапазон)

635 нм (видимый диапазон)

Разрешение: ..... 1 мм

Скорость измерения:.....программируется от одного показания за 5 с до 20 показаний в секунду

Выходной сигнал:.....4–20 мА; максимальное сопротивление нагрузки 1200 Ом, с программированием от нуля до максимального значения

Выход для локального

программирования:..... RS-232C

Изоляция: .....1000 В по постоянному току.

Потребляемая мощность: ..... 36 Вт в максимуме

Напряжение питания: .....24 В по постоянному току

Диапазон рабочих температур:..... от –40 до +50 °С

Уровнемер следует установить на некотором удалении от верхнего патрубка камеры для предотвращения перегрева устройства, а лазерный луч вводить внутрь камеры посредством металлического зеркала. Металлическое зеркало не входит в комплект обязательной поставки и поэтому должно быть изготовлено дополнительно, исходя из условий его размещения по месту.

Размеры секторных меток определяются точностью позиционирования при вращении и не должны превышать по ширине 2 мм.

Позиционирование заданного сектора в зоне загрузки/выгрузки будет проходить по алгоритмам, которые рассмотрены в пункте 4.5.3.

Следует отметить, что предложенная схема контроля положения диверторного стола по вертикали работоспособна при условии нахождения на столе сменных элементов либо их макетов, размеры которых идентичны размерам самих сменных элементов. Это ограничение объясняется тем, что только через верхние технологические окна существует возможность надёжного измерения координат стола по вертикали, и отражающей поверхностью в этом случае будет поверхность сменного элемента. Ввиду этого после монтажа диверторного стола следует установить на него макеты сменных элементов, а циклы выгрузки сочетать с загрузкой для того, чтобы на поверхности стола всегда находились сменные элементы, и всегда при работе СПДШУ существовала возможность перемещения диверторного стола по вертикали. Нахождение сменных элементов на столе непосредственно во время загрузки/выгрузки не обязательно, так как в это время стол по вертикали двигаться не должен.



## 4.5. Разработка схемы управления электромеханическими приводами подвижного диверторного устройства (ПДУ)

### 4.5.1. Разработка математической модели линейного электромагнитного двигателя. Расчёт силовой характеристики $F(x)$

Электродинамические силовые приводы с использованием воздействия на постоянные магниты поля статорной обмотки широко применяются в исполнительных механизмах. К их достоинствам относятся возможность получения различных силовых характеристик и высоких усилий при большой длине хода якоря, хорошие массогабаритные параметры. Наиболее высокие параметры имеют приводы, в которых используются высококачественные современные магниты из материалов на основе Fe-Nd-B. Расчеты силовых взаимодействий для таких приводов могут быть проведены на основе их токовых моделей. В данном случае токовая модель используется при расчёте электродинамического возвратно-поступательного привода, который предназначен для перемещения диверторного стола ТОКАМАКа КТМ.

#### *Описание математической модели привода*

Используемый возвратно-поступательный привод, показанный на рис. 4.5.1.1, имеет статорную обмотку 1 и размещённый на оси постоянный магнит 2 на немагнитном штоке 3. Возвратно-поступательное движение обеспечивается поочерёдным втягиванием штока с магнитом в обмотку и выталкиванием его из обмотки при последовательных изменениях направления тока.

#### *Токовая модель постоянного магнита*

В соответствии с токовой моделью постоянный магнит представляется в виде соленоида таких же форм и размеров. Т.о. магнит в показанной на рис. 4.5.2.1 схеме может быть представлен как соленоид с бесконечно тонкой обмоткой и с числом ампервитков на единицу длины  $i_2 \cdot n_2 / l_2 = M$ , где  $i_2$  – ток;  $n_2$  – число витков;  $M$  – намагниченность магнита;  $l_2$  – длина магнита или иначе длина соленоида.

#### *Общая модель системы «статорной обмотки» – сердечник (постоянный магнит)*

Магнитную энергию  $W$  системы, состоящей из токовой обмотки ЭМД и сердечника можно выразить как

$$W(x) = \frac{1}{2} L_1 \cdot i_1^2 + \frac{1}{2} L_2 \cdot i_2^2 + \frac{1}{2} L_{12}(x) \cdot i_1 i_2,$$

где  $L_1, L_2$  – собственные индуктивности статорной обмотки и соленоида, моделирующего постоянный магнит сердечника;  $L_{12}(x)$  – зависящая от

размещения центра соленоида относительно центра статорной обмотки взаимная индуктивность токовой обмотки и соленоида;  $i_1$  – ток в статорной обмотке;  $i_2$  – ток в соленоиде.

Направим ось  $x$  по оси симметрии системы, совместив  $x = 0$  с центром статорной обмотки и определим положение центра соленоида на оси как его координату. Тогда действующую на магнит силу  $F(x)$  можно найти как производную магнитной энергии  $dW(x)/dx$ . Но собственные индуктивности не зависят от  $x$ , и после дифференцирования остаётся только слагаемое  $L_{12}(x)$ .

Поэтому

$$F(x) = i_1 i_2 \frac{dL_{12}(x)}{dx}. \quad (1)$$

Если учесть выражение для ампер витков, то

$$F(x) = i_1 \frac{Ml_2}{n_2} \frac{dL_{12}(x)}{dx}. \quad (2)$$

Таким образом, сила, действующая со стороны обмотки на магнит, будет являться в данной модели функцией положения магнита внутри статорной обмотки. Для получения этой зависимости следует определить вид  $L_{12}(x)$ .

Токовые представления магнитов часто позволяют намного сократить процесс вычислений с использованием известных из электротехники выражений для собственных и взаимных индуктивностей. Так, для расчёта взаимной индуктивности статорной обмотки с соленоидом в показанном на рис. 4.5.2.1 приводе можно использовать, например, метод эквивалентных круговых катушек. Сущность метода заключается в том, что для расчета взаимной индуктивности каждая катушка заменяется двумя «эквивалентными круговыми контурами», диаметр и положение которых определяют так, чтобы при соответствующей магнитодвижущей силе, т. е. при соответствующем токе и числе витков, эти контуры создавали приблизительно такое же магнитное поле, как и катушка в целом.

Применительно к рассматриваемому случаю контуры, эквивалентные статорной обмотке, обозначим цифрами 3 и 4 (рис. 4.5.1.1), контуры, эквивалентные соленоиду, цифрами 1, 2. Тогда искомая взаимная индуктивность статорной обмотки и магнита определится по формуле

$$L_{12} = \frac{n_1 \cdot n_2}{4} (M_{13} + M_{14} + M_{23} + M_{24}) \quad (3)$$

где  $M_{13}$  – взаимная индуктивность круговых контуров 1 и 3;  $M_{14}$  – то же для контуров 1 и 4 и т. д.

У статорной обмотки аксиальный размер  $a$  (длина) больше её радиального размера  $r$  (толщины), поэтому соответствующие ей контуры должны иметь диаметр

$$d_e = d \left( 1 + \frac{r^2}{6d^2} \right) \quad (4)$$

и должны быть расположены симметрично относительно катушки на расстоянии

$$l = \sqrt{\frac{(a^2 - r^2)}{3}}, \text{ (рис. 4.5.1.1).} \quad (5)$$

Для круговых витков соленоида диаметры примем равными внешнему диаметру магнита ввиду того, что соленоид имеет толщину обмотки, стремящуюся к нулю.

Контуры круговых витков соленоида будут располагаться также симметрично относительно его центра.

Входящие в формулу взаимные индуктивности эквивалентных круговых контуров могут быть определены по формуле

$$M = \mu_0 \sqrt{R_1 R_2} \left[ \left( \frac{2}{\kappa} - \kappa \right) K - \frac{2}{\kappa} E \right], \quad (6)$$

где

$$\kappa^2 = \frac{4R_1 R_2}{(R_1 + R_2)^2 + x^2}, \quad (7)$$

а  $K$  и  $E$  – полные эллиптические интегралы первого и второго рода с модулем  $\kappa$ . В формулах  $R_1$  и  $R_2$  – радиусы соответствующих круговых контуров;  $x$  – расстояние между контурами.

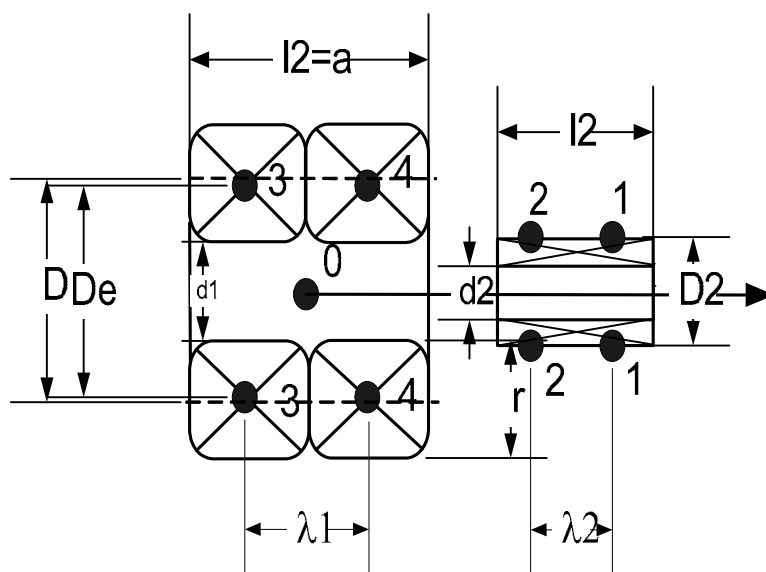


Рис. 4.5.1.1. Представление электропривода системой круговых контуров

После проведённых расчётов по формулам (1–7) был определён аналитический вид функции  $F(x)$ , её графическое изображение приведено на рис. 4.5.1.2. Силовая характеристика  $F(x)$  определялась при токе в токовой обмотке равном 25 А, намагниченность сердечника задана величиной  $M = 800$  кА/м, что соответствует характеристикам закритичных магнитов, например, Fe-Nd-B, количество витков токовой обмотки  $n_1 = 1000$  шт.

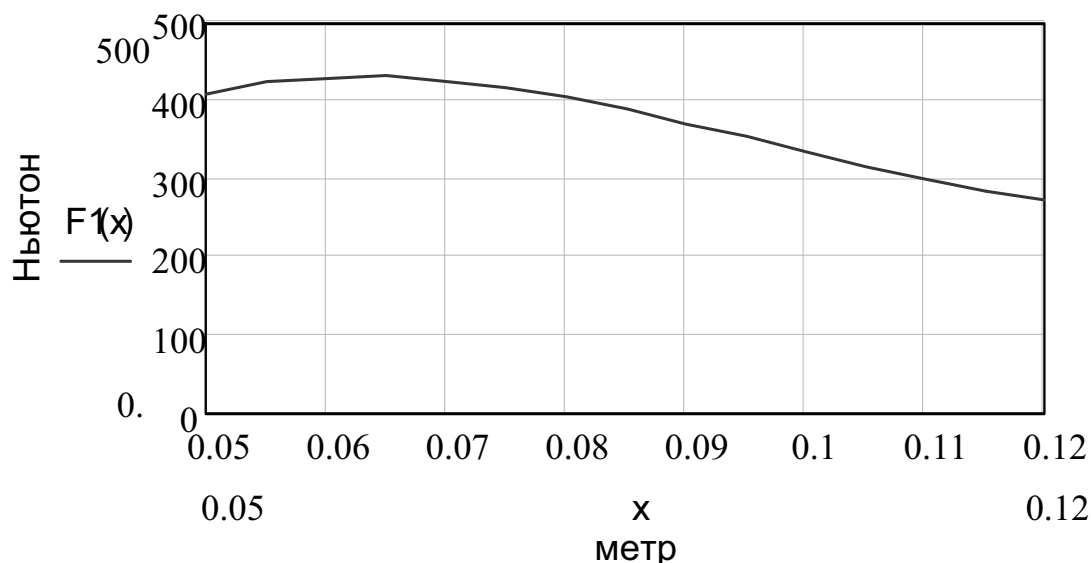


Рис. 4.5.1.2. Силовая характеристика электромагнитного двигателя

Из рисунка видно, что усилие развиваемое двигателем при заданных характеристиках на всём участке рабочего хода (0,05 – 0,1 м), имеет значение больше 200 Н. Такое усилие, в соответствии с имеющимися исходными данными, является достаточным для перемещения ПДУ в вертикальном и тороидальном направлениях.

Также можно отметить, что ток в обмотке двигателя может быть снижен до 10–12 А за счёт снижения напряжения питания для того, чтобы обеспечить более плавный ход якоря при требуемом усилии в 200 Н.

#### **4.5.2. Расчёт параметров обмотки двигателя.**

##### **Определение требований к управляемым источникам питания (ИП) приводов подъёма/вращения диверторного стола**

На рис. 4.5.2.1 представлена конструкция электромагнитного двигателя. Приводы данной конструкции обеспечивают перемещение диверторного устройства ТОКАМАКа КТМ.

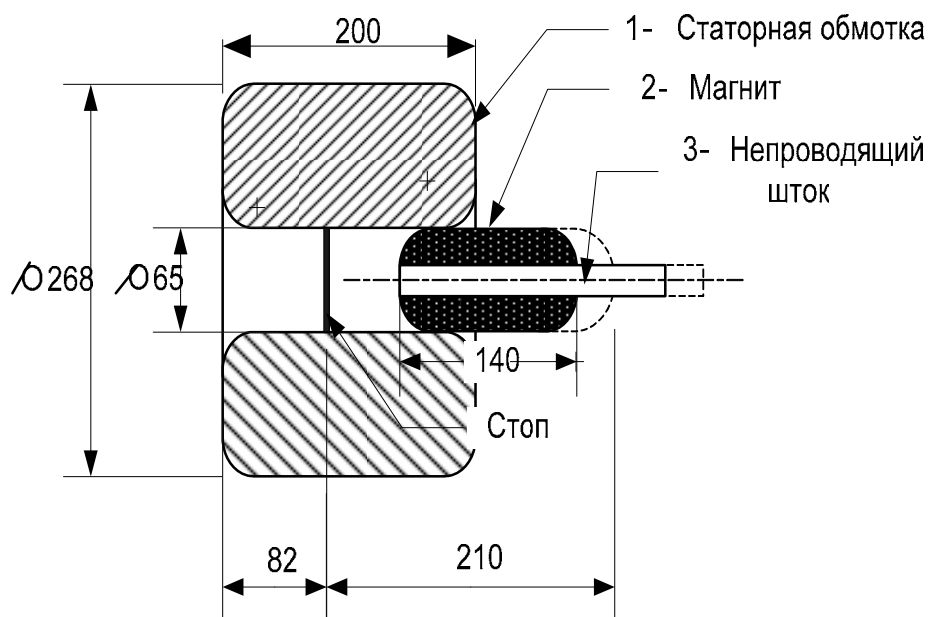


Рис. 4.5.2.1. Конструкция электромагнитного двигателя диверторного стола ТОКАМАКа КТМ

**Исходные данные:**

внешний диаметр катушки	– $d_1 = 0,2685$ м;
внутренний диаметр катушки	– $d_2 = 0,065$ м;
длина катушки (аксиальный размер)	– $a = 0,2$ м;
средний диаметр катушки	– $d = 0,167$ м;
толщина (радиальный размер)	– $r = 0,102$ м;
диаметр провода обмотки	– $d_{pr} = 0,00254$ м.

(Обмоточный провод ПЭВ-1 с эмалевой изоляцией предназначен, в частности, для изготовления обмоток эл. машин).

Исходя из геометрических размеров обмотки привода (рис. 4.5.2.2), были рассчитаны её индуктивность и активное сопротивление.

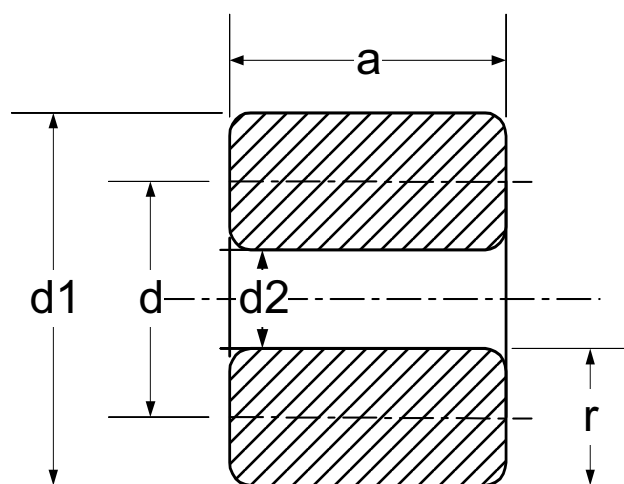


Рис. 4.5.2.2. Поперечное сечение обмотки электромагнитного двигателя

Была определена постоянная времени  $\tau = L/R$  обмотки. Следует заметить, что эта величина меняется мало для катушек одинаковых размеров с различным диаметром провода и с одинаковым коэффициентом заполнения. Поэтому был выбран диаметр провода обмотки с расчётом на максимально возможный ток в обмотке. Характеристики двигателя представлены в табл. 4.5.1.

Таблица 4.5.1

*Характеристики электромагнитного двигателя*

Индуктивность обмотки, L (Гн)	0,13 3
Активное сопротивление обмотки, R (Ом)	0,71
Диаметр провода обмотки, $d_{пр}$ (мм)	4,4
Количество витков в обмотке, n	1000
Максимально допустимый ток, $I_{max}$ (А)	100
Время нарастания тока, $t_{1,0,95}$ (с)	0,75
Величина добавочного сопротивления, $R_{доб}$ (Ом)	2
Время нарастания тока (при добавочном сопротивлении), $t_{2,0,95}$ (с)	0,17
Намагниченность якоря (материал Fe-Nd-B), M (кА/м)	800

На основании данных, приведенных в таблице, можно сказать, что при времени нарастания тока до 100 А в обмотке, равном 0,75 с, максимальная частота срабатываний двигателя составит меньше 1 Гц. Частота в 1 Гц не позволит обеспечить приемлемую скорость перемещения ПДУ. Поэтому для уменьшения времени нарастания тока предлагается снизить его амплитуду путём введения в цепь обмотки токоограничивающего сопротивления. Кривая изменения тока в цепи «обмотка электродвигателя – добавочное сопротивление» при напряжении источника 70 В и величине добавочного сопротивления 2 Ом показана на рис. 4.5.2.3. Из рисунка видно, что в этом случае время нарастания тока составляет до 0,17 с. При таком времени нарастания частота срабатываний двигателя составит около 3 Гц. На основе данных табл. 4.5.1 была определена силовая характеристика  $F(x)$  электропривода на участке рабочего перемещения сердечника 50–120 мм от середины обмотки двигателя, приведённая на рис. 4.5.1.2 (показан выше). Из рисунка видно, что при расчетных параметрах обмотки, напряжении питания 70 В и добавочном сопротивлении 2 Ом усилие толкателя двигателя будет больше 300 Н на всей длине рабочего хода якоря. В ходе наладки и эксплуатации усилие, развиваемое электродвигателем, можно будет варьировать, изменяя напряжение источника питания, а динамику переходных процессов в двигателе можно будет менять за счёт подбора добавочного сопротивления.

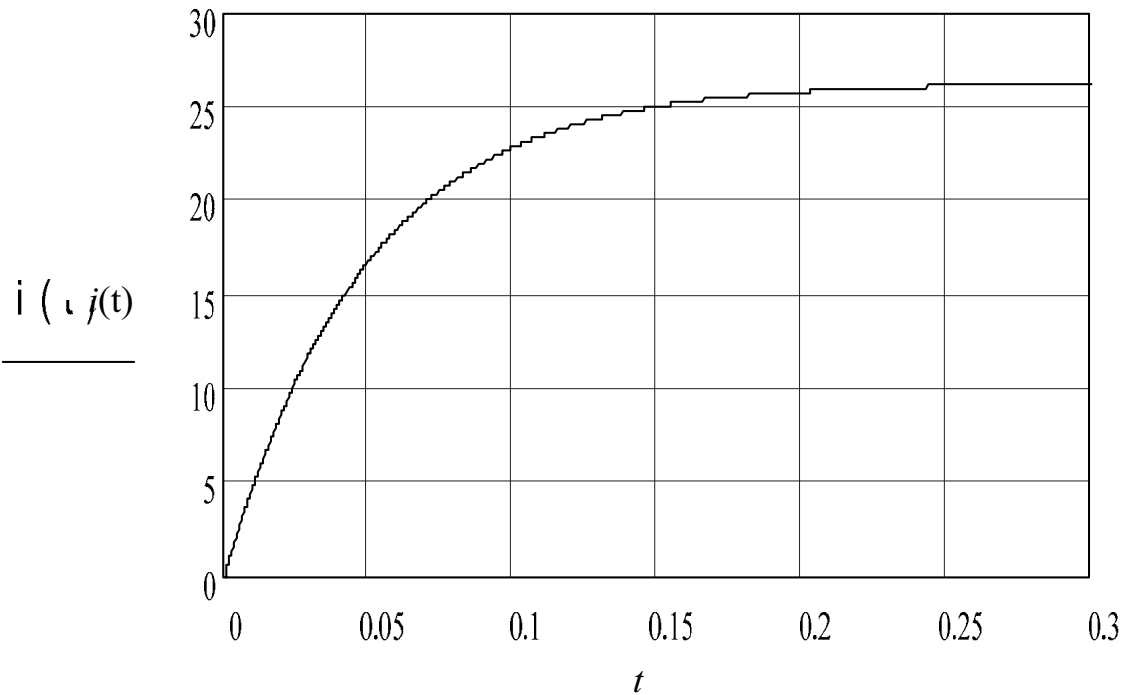


Рис. 4.5.2.3. Кривая нарастания в обмотке двигателя при добавочном сопротивлении величиной 2 Ом и напряжении питания 70 В

Функция, представленная блоком 10, – это функция полного останова СПДШУ, данная функция выполняется либо по команде оператора, либо при возникновении аварийной ситуации.

В случае возникновения аварийных ситуаций в процессе выполнения любого из перечисленных блоков происходит передача управления блоку 7 – обработка аварийной ситуации – с последующим остановом СПДШУ, который выполняется блоком 10, или продолжением нормальной работы, в зависимости от серьезности аварийной ситуации.

#### 4.6. Разработка структурно-функциональной схемы управления подвижным диверторным и шлюзовым устройствами

При разработке отдельных частей системы управления диверторным и шлюзовым устройствами (гидравлический привод, система измерения положения стола и система управления перемещением стола) были определены и сведены в таблицу (см. табл. 4.6) все необходимые для выполнения автоматизации СПДШУ точки управления и контроля.

# ОТДЕЛЬНЫЙ ФАЙЛ

Таблица 4.6

Перечень точек контроля и управления процессом загрузки/выгрузки  
сменных элементов (продолжение)

N п/п	Процесс (технологическое оборудование)	Наименование		Тип	Кол-во	Погрешность	Диап. изм.	Ед. изм.	Тип вх/вых. сигн.	Обознач. на схеме
1	Позиционирование диверторного стола	Измерение положения по вертикали		к	3	1 мм	200–900	мм	4–20 мА	D1
		Измерение радиального положения стола		к	1					
		Перемещение стола по оси Z	вверх	у	4				Дискретный (0–24 В) высокий уровень	
			вниз		4					
		Вращение стола	влево	у	2				Дискретный (0–24 В) низкий уровень	
			вправо		2					



N п/п	Процесс (технологическое оборудование)	Наименование	Тип	Кол-во	Погрешность	Диап. изм.	Ед. изм.	Тип вх/вых. сигн.	Обознач. на схеме
		Измерение температуры обмотки электродвигателя	к	12	1 %		град	Дискретный 0-24 В	
2	Гидравлический привод	Давление масла на выходе насосной станции	к	1	1 %		МПа	4–20 мА	МН
		Давление масла в сильфоне внешн. Люка (С)	к	1					
		Давление масла в гидроци-линдре ГД1	к	1	1 %		МПа	4–20 мА	МН1
		Давление в уплотнительной манжете (М)	к	1					
		Управление гидроци-линдром ГД1:	Подача масла	у	1				-10..0 В
Сброс масла							0..+10 В		
Гидравли-ческий привод	Управление сильфоном	Подача масла	у	1				-10..0 В	РП2
		сброс масла						0..+10 В	
	Управление манжетой	Подача масла	у	1				-10..0 В	РП3
		сброс масла						0..+10 В	
	Положение золотника РП1		к	1				-10..10 В	РП1
	Положение золотника РП2		к	1				-10..10 В	РП2
	Положение золотника РП3		к	1				-10..10 В	РП3
	Уровень масла в баке		к	1	1 %		м	Дискретный 0–24 В	РУ
	Температура масла		к	1	1 %		град	Дискретный 0-24	РТ





Структурно-функциональная схема подсистемы управления построена в предположении, что процесс позиционирования диверторного стола осуществляется в автоматическом режиме, а процесс загрузки/выгрузки сменных элементов осуществляется с минимальным участием оператора. Сложность данной системы обусловлена также тем, что при загрузке-выгрузке сменных элементов должна быть исключена разгерметизация рабочей камеры КТМ, и в связи с этим появляется необходимость в контроле основных технологических параметров СПДШУ, таких как давление в ветвях гидропривода, давления в рабочей камере и в шлюзовом устройстве:

- модуль ЦПУ;
- модуль АЦП(16 каналов);
- модуль ЦАП(4 канала);
- модуль вывода дискретных сигналов(12 каналов);
- модуль ввода дискретных сигналов(16 каналов).

Связь с верхним уровнем системы осуществляется по кабельной линии связи на основе интерфейса RS-485. Управление системой ПДШУ в процессе эксплуатации установки будет осуществляться с помощью переносного операторского пульта, выполненного на базе планшетного компьютера. Этот пульт взаимодействует с системой автоматизации экспериментов по беспроводной линии связи Radio Ethernet. С помощью данного пульта будет осуществляться управление процессом загрузки/выгрузки сменных элементов и позиционирование диверторного стола при участии оператора либо сменного инженера, находящегося непосредственно в экспериментальном зале.

Интеллектуальная часть подсистемы управления СПДШУ выполнена на базе модульного микропроцессорного контроллера, состоящего из пяти основных блоков.

#### **4.7. Определение структуры комплекса технических средств (КТС) подсистемы управления ПДШУ**

Общая структура комплекса технических средств подсистемы управления ПДШУ была составлена на основе перечня точек контроля и управления. Данный перечень приведён в табл. 4.6.

Структура КТС представлена на рис. 4.7. Из рисунка видно, что весь комплекс условно разделён на два уровня:

1. Уровень исполнительных механизмов и первичных преобразователей
2. Уровень управления, к которому относится модульный контроллер.



Первый уровень можно разделить на три части – по количеству выполняемых процессов:

- датчики и исполнительные механизмы, обеспечивающие процесс перемещения диверторного стола;
- процесс измерения положения и контроля горизонтальности диверторного стола;
- процесс загрузки/выгрузки сменных элементов в рабочую камеру.

На первом уровне также находится управляемый выпрямитель, обеспечивающий питание электроприводов перемещения стола. На основе структуры комплекса технических средств подсистемы ПДШУ была составлена заказная спецификация на элементы модульного микропроцессорного контроллера системы управления ПДШУ ТОКАМАКа КТМ (табл. 4.7.1) и заказная спецификация на датчики и исполнительные механизмы СПДШУ (табл. 4.7.2).

Таблица 4.7.1

*Заказная спецификация на элементы модульного микропроцессорного контроллера системы управления ПДШУ ТОКАМАКа КТМ*

Наименование узла	Тип; характеристики; фирма производитель	Кол-во, шт	Примечание
Компьютерное шасси	IPC-6806; 6 слотов расширения ISA, 150-ваттный источник питания; Advantech	1	Номер для заказа: IPC-6806
Процессорная плата	PCA-6145B; процессор AMD, контроллер EIDE с поддержкой 2 IDE-устройств, встроенный контроллер Ethernet (10 Мбит/с), поддержка твердотельных дисков DiskOnChip фирмы M-systems; Advantech	1	Номер для заказа: PCA-6145B
Модуль ввода/вывода дискретных сигналов	PCL-730; 16 дискретных оптоизолированных канала ввода, 16 дискретных оптоизолированных канала вывода, напряжение изоляции 2500 В; Advantech	1	Номер для заказа: PCL-730
Модуль постоянной памяти (флэш-диск)	PCD-2000; 16 Мбайт, поддерживается DOS 3.3 и выше, корпус DIP32; M-Systems	1	Номер для заказа: PCD-2000-0400
Модуль аналого-цифрового преобразования	ISO-AD32L; 16 дифференциальных каналов, разрядность 12 бит, гальваническая изоляция 500 В	1	Номер по каталогу: IS90000220020

Окончание табл. 4.7.1

Наименование узла	Тип; характеристики; фирма производитель	Кол-во, шт	Примечание
Нормирующие преобразователи	SCM7B32-01D; вход 4...20 мА, выход 0...+10 В, гальваническая изоляция 1500 В	7	Номер по каталогу: T713141480030
Плата клеммников для установки нормирующих преобразователей типа SCM7B	SCM7BP08; монтаж на панель, разъёмы 2*DB25 Male, установлены: предохранитель, токовые шунты, датчик CJC	1	Номер по каталогу: TA00081480020
Модуль цифро-аналогового преобразования	ASL-6128; ЦАП 2 канала, гальваническая изоляция 5000В, разрядность 12 бит	2	Номер по каталогу: IS03000040010
Плата клеммников для ЦАП	ACLD-7285; плата клеммников для ЦАП ACL-6128 с монтажом на панель	2	Номер по каталогу: IO00000040150
Местный пульт настройки системы	Компьютер типа Notebook	1	Стационарно не устанавливается Подключается по RS232 при выполнении операций программирования

Таблица 4.7.2

Заказная спецификация на датчики и исполнительные механизмы СПДШУ

Наименование элемента	Тип; характеристики; фирма производитель	Кол-во, шт
Датчик положения стола по вертикали	Accu-Pulse индикатор уровня и положения лазерного типа; длина волны 905 нм, разрешение 1мм; Thermo Measure Tech	3
Датчик тороидального перемещения	Оптический детектор перемещения	1
Драйвер IGBT транзистора	SKHI 21; сдвоенный драйвер для управления силовыми IGBT-транзисторами; SEMIKRON	6
Силовой модуль на основе IGBT-транзистора	GAR 063; Vce = 600 В, Ice = 30 А; SEMIKRON	12
Тиристорный выпрямитель	Id = 100 А, Ud = 180 В, Ln = 0,5 Гн, Rn = 3 Ом	1

#### **4.8. Проектирование графического интерфейса пульта оператора для управления и отображения параметров системы ПДШУ**

Управление системой ПДШУ в процессе эксплуатации установки будет осуществляться с пульта оператора-технолога, расположенного в пультовой САЭ ТОКАМАКа КТМ, и переносного пульта, выполненного на базе планшетного компьютера. Данные пульта по возможности, предоставляемым оператору по управлению системой, являются равноправными. Отличие между ними состоит в том, что переносной пульт взаимодействует с САЭ по беспроводной линии связи RadioEthernet и поэтому может использоваться при выполнении операций перемещения ПДУ, загрузки и выгрузки сменных элементов в рабочую камеру ТОКАМАКа непосредственно по месту размещения технологического оборудования.

Графический интерфейс подсистемы управления ПДШУ состоит из двух экранов. Первый экран предназначен для общего управления системой ПДШУ (рис. 4.8.1), второй экран используется для визуального контроля параметров состояния системы ПДШУ (рис. 4.8.2).

Рассмотрим содержание экранов графического интерфейса подробнее. Экран управления системой ПДШУ позволяет осуществлять позиционирование стола по вертикали (по  $Z$  координате), вращение стола и открытие/закрытие внешнего и внутреннего люков. Кнопки «открыть/закрыть» (как для внешнего, так и для внутреннего люков) взаимозависимы, т. е. при нажатии одной кнопки она фиксируется в нажатом положении, а вторая наоборот фиксируется в отжатом положении. Таким образом визуально всегда можно определить в каком положении находятся люки шлюзового устройства. На данном экране отображены три значения основных параметра системы: давление в шлюзовой камере, текущее положение стола по вертикали и номер сектора расположенного в области загрузки/выгрузки.

С помощью отдельных форм отображения задаются целевые значения для параметров положения стола по вертикали ( $Z_{уст.}$ ) и номера сектора, перемещаемого в область загрузки/выгрузки ( $N_{уст.}$ ).

Также на экране расположены две кнопки перехода: кнопка «переход на экран параметров состояния системы» и кнопка «переход на главную мнемосхему системы». Алгоритм программы обслуживания пульта должен обеспечивать следующие блокировки:

- запрет открытия второго люка, когда один из них уже находится в открытом состоянии, что должно гарантировать соблюдение вакуумных условий в камере;
- запрет выдачи команды открытия внутреннего люка до тех пор, пока в шлюзовой камере не достигнут высокий вакуум.



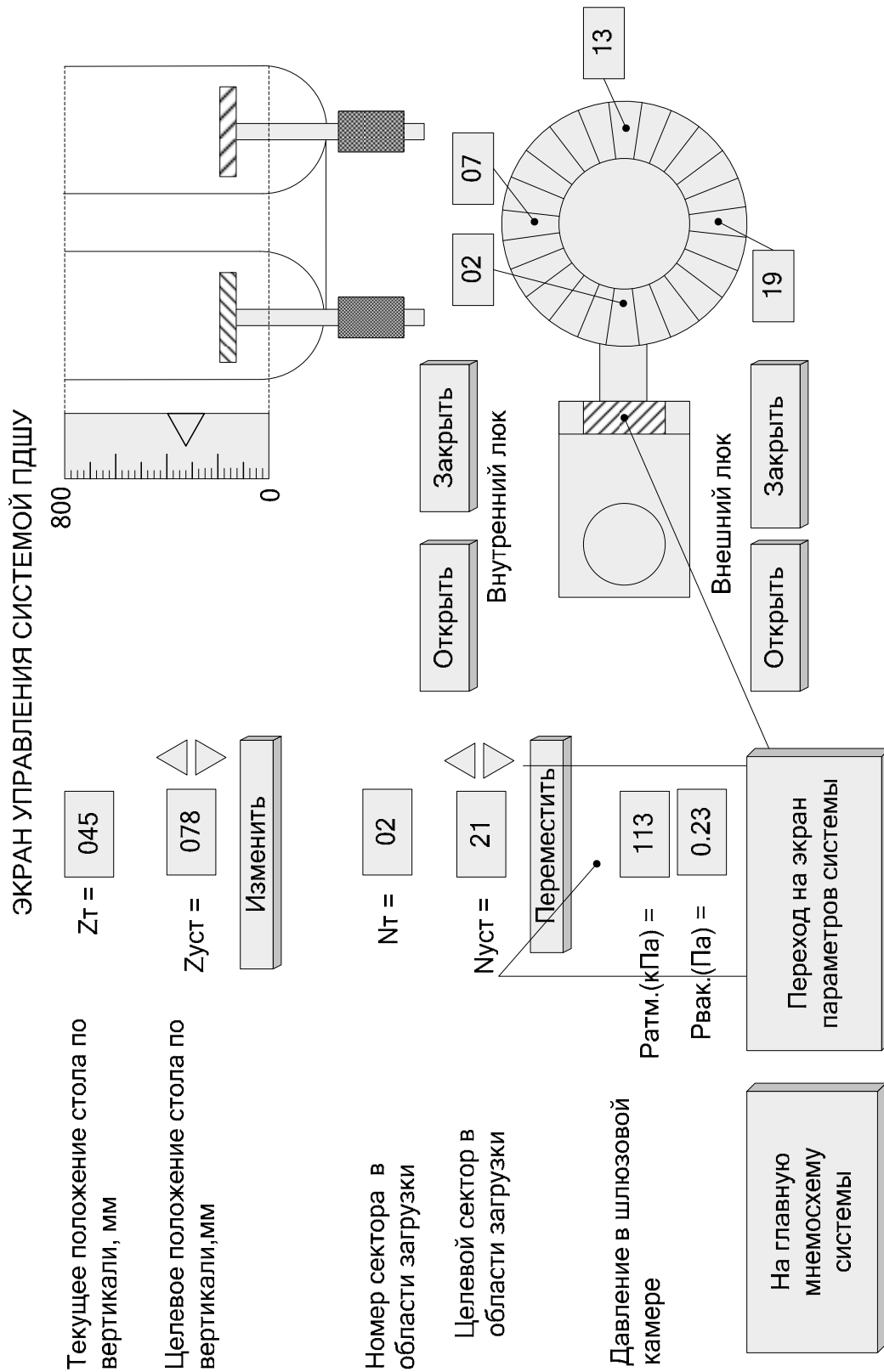


Рис. 4.8.1. Чертёж графического интерфейса подсистемы управления ПДШУ

Экран параметров состояния системы ПДШУ

**Давление в гидроцилиндре внутреннего люка, МПа**

Ргц =

**Давление в манжете внутреннего люка, МПа**

Рм =

**Давление в сильфоне внешнего люка, МПа**

Рс =

**Давление на выходе станции, МПа**

Рст =

**Уставка**

1  2  3  4

**Насосная установка**

**Температура масла**

**Температура электромеханических двигателей**

1	2	3	4
Норма	Норма	Норма	Норма
Выше нормы	Выше нормы	Выше нормы	Выше нормы
5	6	7	8
Норма	Норма	Норма	Норма
Выше нормы	Выше нормы	Выше нормы	Выше нормы
9	10	11	12
Норма	Норма	Норма	Норма
Выше нормы	Выше нормы	Выше нормы	Выше нормы

**Состояние распределителей потока (РП)**

РП1 (гидроцилиндр внутреннего люка)

РП2 (Манжета внутреннего люка)

РП3 (Сильфон внешнего люка)

**Показания уровнемеров, мм**

H1	H2	H3
115	114	115

Параметры выпрямителя

Id=  A; Ud=  В; Uуст=  В.

Горизонтальность стола:

Рис. 4.8.2. Чертёж графического интерфейса пользователя подсистемы управления ПДШУ (экран 2)

На экране параметров состояния системы ПДШУ (рис. 4.8.2) отображаются все параметры, поступающие с первичных преобразователей, показывающих давление в исполнительных механизмах гидропривода, состояние насосной установки, положение золотников в распределителях потока, показания каждого из уровнемеров, температуру электромеханических двигателей, параметры тока на выходе управляемого тиристорного выпрямителя. Также на экран выводится сигнал контроля горизонтальности диверторного стола.

С помощью отдельной формы отображения имеется возможность изменения величины уставки по выходному напряжению управляемого тиристорного выпрямителя.

На этом экране имеется также кнопка «возврат на экран управления ПДШУ».

## 5. СТРУКТУРА КОМПЛЕКСА ТЕХНИЧЕСКИХ СРЕДСТВ ПОДСИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССОМ ВАКУУМНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ПОДГОТОВКИ РАБОЧЕЙ КАМЕРЫ КТМ

На рис. 5.1 показана структура комплекса технических средств систем управления процессом вакуумно-технологической подготовки рабочей камеры.

Комплекс технических средств систем управления процессом вакуумно-технологической подготовки состоит из 3-х уровней. На третьем уровне находится пульт оператора технолога, организованный на базе персонального компьютера IBM PC Pentium-4. На данный уровень возлагается выполнение основной обработки и визуализации информации. Управление процессом вакуумно-технологической подготовки осуществляется монитором реального времени ТРЕЙС МОУД – это программный комплекс, предназначенный для разработки, настройки и запуска в реальном времени систем управления технологическими процессами. Связь с промышленным компьютером управления процессом вакуумно-технологической подготовки ПК осуществляется по каналу сети Ethernet. Компьютер управления процессом вакуумно-технологической подготовки рабочей камеры выполнен в стоечном исполнении и построен на базе ЦПУ PCI-6751L, позволяет производить подготовку и выдачу оперативной информации на III уровень системы, супервизорное управление технологическим оборудованием и т. д. Связь компьютера с устройствами первого уровня осуществляется через модуль связи PCL-847A. Преобразователь RS-485/опто. PROFIBUS-converter D-Sub 9-pole to POF / DOT1 adaptor / 1.5 МВ обеспечивает связь по волоконно-оптической линии с контроллерами управления технологическими подсистемами (СВВО, СВО, СПРК, СПДШУ). Средства микропроцессорной и вычислительной техники первого уровня (специализированные контроллеры) располагаются в стойках и сгруппированы в блоки по соответствующим подсистемам. В табл. 5.1 приведен перечень оборудования микропроцессорной и вычислительной техники.

Рассмотрим состав технических средств технологических подсистем управления процессом высоковакуумной подготовки первого уровня более подробно. Подсистема высоковакуумной откачки (СВВО) рабочей камеры должна обеспечивать откачку рабочей камеры от атмосферного давления и поддержание в ней фонового разряжения до  $10^{-7}$  мм рт. ст. при прогреве стенок камеры до 200 °С.

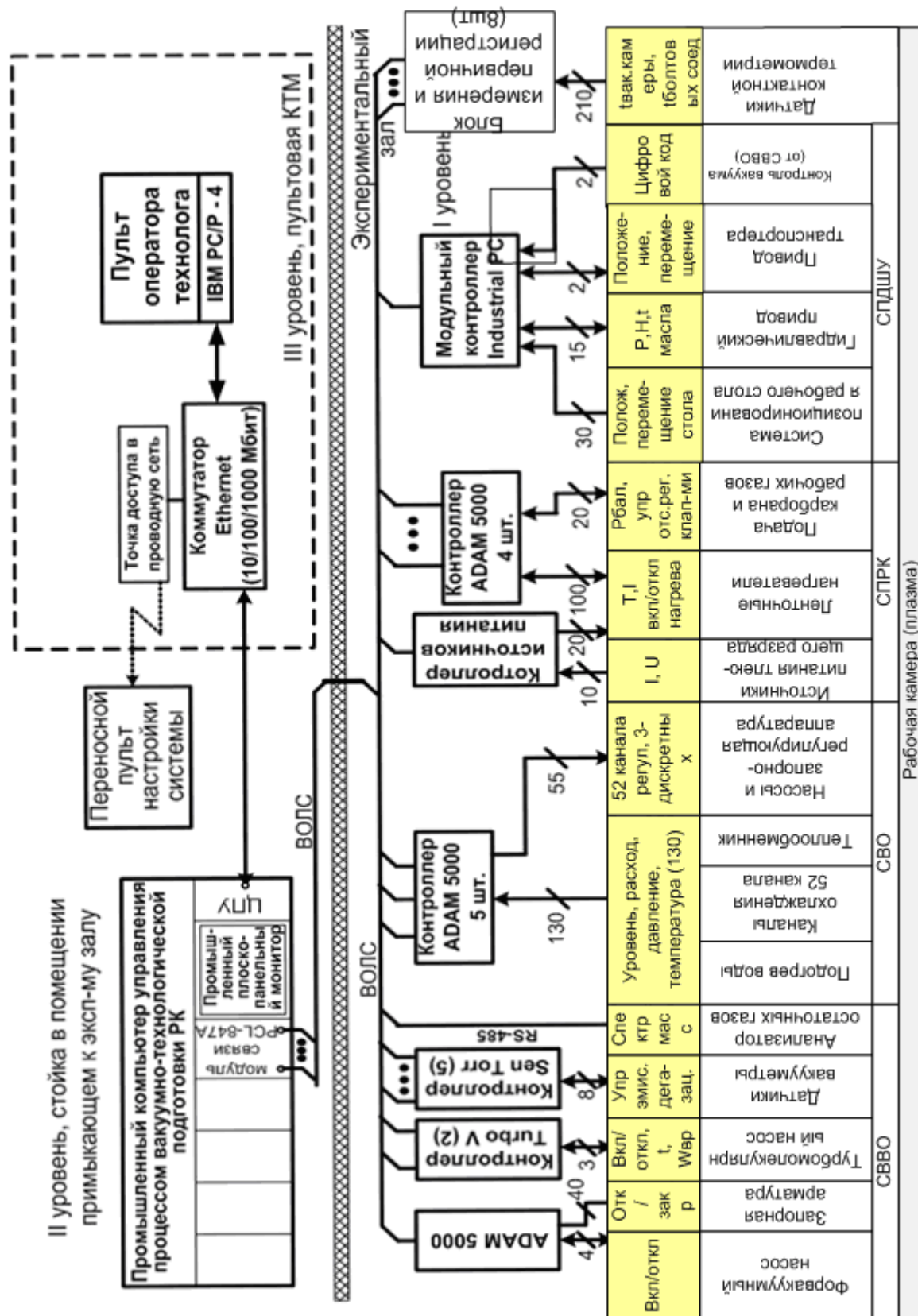


Рис. 5.1. Структура комплекса технических средств системы автоматизации ПРК

При условии использования в технологической схеме подсистемы СВВО насосов высоковакуумной откачки Turbo V1001 управление ими будет осуществляться при помощи специализированных контроллеров, производимых компанией Varian Vacuum Technologies. Данные контроллеры имеют усиленную конструкцию, защищены от электромагнитного излучения, электрических разрядов, пробоев. Управление форвакуумными трактами и насосами осуществляется контроллерами ADAM-5000. Эти контроллеры обеспечивают выдачу сигналов на включение и выключение насосов, а также сигналов на управление запорно-управляющей арматурой. Контроллеры ADAM-5000 располагаются в непосредственной близости от насосов форвакуумной откачки.

Все контроллеры ПСУ СВВО подключаются к промышленному компьютеру посредством волоконно-оптической линии связи (ВОЛС) со скоростью передачи информации до 115,2 Кбод.

Подсистема водяного охлаждения КТМ предназначена для отвода выделяющегося тепла от обмоток электромагнитной системы термоядерной установки, насосов системы высоковакуумной откачки, узлов системы дополнительного высокочастотного нагрева и другой аппаратуры. Сбор данных от первичных преобразователей, характеризующих качество используемой для охлаждения воды, и управление исполнительными механизмами, обеспечивающих температуру расход и давление теплоносителя, обеспечивается микропроцессорными контроллерами типа ADAM-5000. При этом контроллеры располагаются непосредственно вблизи технологического оборудования. На данных уровнях производится первичная обработка информации и выработка управляющих воздействий и заданий на их выполнение. Преобразователь RS-485/опто. обеспечивает связь контроллеров ADAM-5000 с промышленным компьютером управления процессом вакуумно-технологической подготовки РК по оптоволоконной линии связи.

Подсистема подготовки рабочей камеры (ПРК) ТОКАМАКа КТМ предназначена для прогрева патрубков и рабочей камеры до 200°C, очистки её внутренней поверхности и боронизации. Сбор данных от первичных преобразователей, расположенных на поверхности рабочей камеры, и управление исполнительными механизмами, такими как реле ленточных нагревателей и клапан-накатели газов, обеспечивается устройствами сбора данных и управления (УСДУ). УСДУ построено на базе ЦПУ ADAM-5000, в своем составе имеет три модуля ввода сигналов с термодатчиков ADAM-5018, модуль ADAM-5056 S-A для управления реле ленточных нагревателей, модуль дискретного ввода для связи контроллера с датчиками тока и модуль ADAM-5017H, который обеспечивает ввод аналоговых сигналов с датчиков давления. В состав УСДУ(5) добавлен до-

полнительный модуль ADAM-5056 S-A для управления клапан-накателем карборана и включением прогревочного элемента баллона с карбораном, а так же для управления газонапускным оборудованием.

Модуль связи PCL-746+ так же обеспечивает связь с контроллером управления выпрямительным устройством (ВУ1-ВУ3). Контроллер построен на базе ЦПУ РСМ-3335. Управление мостовымисхемами осуществляется двумя модулями управления РСМ-3730, сбор данных – РСМ-3718.

Диверторное устройство является частью ТОКАМАКа КТМ и представляет собой систему, предназначенную для размещения, закрепления и позиционирования элементов, воспринимающих тепловой и корпускулярный поток от плазмы. Диверторное устройство находится внутри вакуумного объема установки (кроме электроприводов диверторного стола, которые расположены вне вакуумного объема рабочей камеры). Интеллектуальная часть подсистемы управления СПДШУ выполнена на базе модульного микропроцессорного контроллера Industrial PC, состоящего из пяти основных блоков:

- модуль ЦПУ;
- модуль АЦП (16 каналов);
- модуль ЦАП;
- модуль вывода дискретных сигналов (12 каналов);
- модуль ввода дискретных сигналов (16 каналов).

Связь со вторым уровнем системы осуществляется по оптоволоконной линии связи (Ethernet). В модуле ЦПУ предусмотрен радио Ethernet для связи с местным пультом управления. С помощью данного пульта (пульт переносной) будет осуществляться управление процессом загрузки/выгрузки сменных элементов и позиционирование диверторного стола непосредственно из экспериментального зала.

На основе выбранных технических средств составлена заказная спецификация на элементы системы автоматизации.

Таблица 5.1

*Перечень оборудования подсистемы управления процессом вакуумно-технологической подготовки ТОКАМАКа КТМ*

№	Наименование оборудования	Кол-во, шт.	Размещение
1	Модуль связи PCL – 847A (4-х кан. RS-485)	1	Стойка общего управления процессом вакуумно-технологической подготовки камеры
	Преобразователь RS-485/опто. PROFIBUS-converter D-Sub 9-pole to POF / DOT1 adaptor / 1.5 MB	4	
	Промышленный плоскочелюстной монитор с 15» TFT ЖК-дисплеем FPM-3150	1	
	Точка доступа в сеть (радио Ethernet) TEW-301ABP 11/22 Mbps	1	
	Процессорная плата PCI-6154L	1	

№	Наименование оборудования	Кол-во, шт.	Размещение
2	Преобразователь RS-485/опто. PROFIBUS-converter D-Sub 9-pole to POF / DOT1 adaptor / 1.5 MB	10	Блок управления форвакуумными насосами. Блок управления турбомолекулярным насосом (ТМН)
	Котроллер Sen Torr	5	
	Котроллер Turbo V	2	
	ЦПУ ADAM-5000	1	
	Модуль дискретного ввода ADAM-5065S-A	1	
	Модуль управления PCM-3718	1	
3	Преобразователь RS-485/опто. PROFIBUS-converter D-Sub 9-pole to POF / DOT1 adaptor / 1.5 MB	3	Блок управления системой водяного охлаждения
	ЦПУ ADAM-5000	3	
	Модуль дискретного ввода ADAM-5065S-A	3	
	Модуль управления PCM -3718	2	
	Модуль ввода аналоговых сигналов ADAM-5017	1	
4	ЦПУ PCA-6154	1	Шкаф с блоками управления процессом подготовки камеры и контроля температуры обмоток ЭМС и контроллерами вакууметров (6 шт)
	Модуль связи PCL – 847A	1	
	ЦПУ ADAM-5000	5	
	Модуль ввода сигнала термодпар ADAM-5018	15	
	Модуль дискретного ввода ADAM-5065S-A	6	
	Модуль ввода аналоговых сигналов ADAM-5017	1	
	ЦПУ PCM-3335	1	
	Модуль управления PCM -3718	3	
	Преобразователь RS-485/опто. PROFIBUS-converter D-Sub 9-pole to POF / DOT1 adaptor / 1.5 MB	12	
5	Модуль связи PCL – 847A	1	Шкаф с блоком управления подвижным диверторным и шлюзовым устройством
	Компьютерное шасси IPC-6806	1	
	Процессорная плата PCA-6145B	1	
	Модуль ввода/вывода дискретных сигналов PCL-730	1	
	Модуль постоянной памяти (флэш-диск) PCD-2000	1	
	Модуль аналого-цифрового преобразования ISO-AD32L	1	
	Нормирующий преобразователь SCM7B32-01D	7	
	Модуль цифро-аналогового преобразования ASL-6128	2	
	Плата клеммников для ЦАП ACLD-7285	2	
	Местный пульт настройки системы. Планшетный компьютер Tablet PC CT60	1	
	Преобразователь RS-485/опто. PROFIBUS-converter D-Sub 9-pole to POF / DOT1 adaptor / 1.5 MB	1	
6		1	Блок управления анализатором остаточных газов



Таблица 5.2

*Перечень оборудования I уровня подсистем управления процессом вакуумно-технологической подготовки ТОКАМАКа КТМ*

Процесс, изм. параметр	№	Наименование оборудования	Кол-во, шт.	Размещение	Диап. изм.
Разряжение	1	Convectorr	2	Блоки высоковакуумной откачки (БВО)	$10^{-3}-10^3$ торр
	2	Bayard-Alpert	2		$10^{-3}-10^{-10}$ торр
	3	Convectorr	1	Шлюзовое устройство	$10^{-3}-10^3$ торр
	4	Bayard-Alpert	1		$10^{-3}-10^{-10}$ торр
	5	Convectorr	2	Блок форвакуумной откачки (БФО)	$10^{-3}-10^3$ торр
Анализ остаточных газов	6	Время пролетный масс-спектрометр МХ-7304А	1	БВО № 1, 2	1–200 а.е.м
Температура	7	ТХА Метран-241	5	БВО № 1, 2	20–400 °С
	8	ТХА Метран-241	5	БФО	20–400 °С
Состояние	9	«Сухой контакт»	25	БВО № 1, 2	
	10	«Сухой контакт»	15	БФО	
Проводимость воды	11	Кондуктометр КЭС-1	1		0–1 мкСм/см
Концентрация растворенного кислорода в воде	12	Термооксиметр Экотест-2000	1		0–20 мг/кг
Уровень	13	Метран-43ДГ (ДУ 25)	3		
Температура воды в баке	14	ТСМ Метран-253	2		0–100 °С
Расход воды	15	Метран-300ПР (ДУ 25)	2		0–70 м <sup>3</sup> /ч
Расход воды	16	Реле протока РПИ-25	52	В каналах охлаждения	0–1.4 м <sup>3</sup> /ч
Температура воды	17	ТСМ Метран-253	53	Каналы охлаждения и отводящий коллектор	0–100 °С

Продолжение табл. 5.2

Процесс, изм. параметр	№	Наименование оборудования	Кол-во, шт.	Размещение	Диап. изм.
Давление	18	Метран-22ДИ	2	В коллекторах	
Температура болтовых соединений	19	ТХА Метран-241	314	Обмотки ЭМС	0–300 °С
Температура	20	ТХА Метран-241	8	Вакуумные насосы	0–300 °С
	21	ТХА Метран-241	4	ВЧ-генераторы	0–300 °С
Прогрев камеры	22	реле 220 В, 4 А 5П19.10ТМ1-10-6	50	СПРК	
Температура	23	ТХА Метран-241	100		0–250 °С
	24	Трансформатор тока	50		0–4 А
	25	Замыкатель 220 В, 150 А	1		вкл./откл.
Очистка тлеющим разрядом в среде аргона, гелия	26	Трансформатор тока	3		0–5 А
	27	Манометр	5		0,1–15 МПа
	28	Трансформатор напряжения	1		0–2000 В
	29	Тиристорный преобразователь	3		0–2000 В
Боронизации	30	реле 220 В, 4 А	1		
	31	ТХА Метран-241	1		0–200 °С
	32	Эл. магн. клапан	1		–
Напуск рабочих газов	33	Пьезоклапан	2		–
	34	Эл. магн. клапан натекания	2		–
Род тех. оборудования					
Высоковольт. затв.	35	ЗПТ-25	2	БВО № 1, 2	Откр/Закр
	36	ЗМКИ	4		Откр/Закр
Клапан (магн.)	37	КВМ-63	4		Откр/Закр
Клапан (эл. мех.)	38	КВЭ-63	4		Откр/Закр
	39		7	БФО	Откр/Закр

Процесс, изм. параметр	№	Наименование оборудования	Кол-во, шт.	Размещение	Диап. изм.
Высоково- вак. затв.	40	ЗПТ-25	1	Порт ввода/вывода	Откр/Закр
	41	КВМ-63	1		Откр/Закр
	42	ЗМКИ	1	Диагностики	Откр/Закр
	43	КВЭ-63	1		Откр/Закр
Насосы	44	ТМН-1000*	4	БВО № 1, 2	Лог. прогр. упр.
	45	АВЗ-63Д	2	БФО	Вкл/Выкл
Шлюзовое устройство	46		1		

*Примечания:*

1. В табл. 5.1 и 5.2 приведены цены на оборудование без учета стоимости коммуникационного оборудования (20 %), 20 % – НДС, 10 % – таможенные пошлины, 5 % – доставка и таможенное оформление доставки.
2. В случае отсутствия цены в соответствующем поле таблицы цена на оборудование договорная или не предоставлена производителем.
3. Общая сумма оборудования систем управления процессом вакуумно-технологической подготовки рабочей камеры приведена по экспертным оценкам.
4. Оборудование I уровня СУТП, указанное в табл. 5.2, входит в состав технологических систем вакуумно-технологической подготовки рабочей камеры, и его стоимость должна быть учтена разработчиками соответствующих систем.

## 6. ЗАЩИТА ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ КАНАЛОВ ПОДСИСТЕМЫ ВАКУУМНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ПОДГОТОВКИ ОТ ВОЗДЕЙСТВИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОМЕХ

Датчики и измерительные каналы, размещаемые на вакуумной камере и в экспериментальном зале, подвергаются воздействию электромагнитных помех. В табл. 6.1 приведена информация по размещению датчиков систем вакуумно-технологической подготовки КТМ и построению измерительных каналов.

Таблица 6.1

*Размещение датчиков систем вакуумно-технологической подготовки КТМ*

№	Тип первичного преобразователя	Кол-во	Размещение	Измеряемый параметр	Особенности измерения
1	ТХК	314	на вакуумной камере	Температура болтовых соединений обмоток ЭМС	Вывод сигнала 0–50 мВ от датчика до стойки. L = 5–10 м
2	ТХК	8	Приямок	Температура вакуумных насосов	Контроллер в непосредственной близости от датчика
3	ТХК	4	Экспериментальный зал	Температура ВЧ-генераторов	Контроллер в непосредственной близости от датчика
4	ТСМ	53	Приямок	Температура воды в каналах охлаждения и отводящем коллекторе	Нормирующий преобразователь по месту размещения датчика, 0–5 мА
5	ТСМ	2	Приямок	Температура воды в баке	Нормирующий преобразователь по месту размещения датчика, 0–5 мА
6	Реле протока РПИ-25	52	Приямок	Расход воды в каналах охлаждения	Нормирующий преобразователь по месту размещения датчика, 0–5 мА
7	Метран-300	2	Приямок	Расход воды в каналах охлаждения	Нормирующий преобразователь по месту размещения датчика, 0–5 мА
8	Метран-22ДИ (Сапфир -22ДИ)	2	Приямок	Давление в коллекторах	Нормирующий преобразователь по месту размещения датчика, 0–5 мА

Окончание табл. 6.1

9	Метран-43ДГ	3	Приямok; прилегающее помещение	Уровень	Нормирующий преобразователь по месту размещения датчика, 0–5 мА
10	Термооксиметр Экотест-2000 (НПП «Эко-никс»)	1	прилегающее помещение	Концентрация растворенного кислорода в воде	Измерение по месту размещения датчика
11	Кондуктометр КЭС-1 (НПО «Аврора»)	1	прилегающее помещение	Проводимость воды	Измерение по месту размещения датчика

В том случае, когда нормирующий преобразователь находится по месту размещения датчика, защита от электромагнитных помех не представляет принципиальных трудностей, т. к. по линии связи передается унифицированный токовый сигнал. В соответствии с табл. 6.1 влиянию помех в наибольшей степени будут подвержены каналы измерения температуры болтовых соединений обмоток ЭМС.

На рис. 6.1 показано размещение кабельных термодпар КТХА (ХК) на болтовых соединениях обмоток ЭМС для одного сектора вакуумной камеры ТОКАМАКа КТМ. Термодпарный кабель приваривается к соответствующему элементу конструкции вакуумной камеры. Термоэлектрический спай изолирован от стального экрана кабельной термодпары, сопротивление изоляции 500 МОм. Сигнал с датчика передается в стойку сбора данных.

Для защиты линии связи «датчик–стойка сбора данных» от воздействия электромагнитных помех могут быть использованы следующие основные методы: электромагнитное экранирование, рациональное размещение линий связи, обеспечение соответствующего заземления, интегрирование и цифровая фильтрация измерительных сигналов.

Оценим влияние электромагнитных помех на каналы измерения температуры болтовых соединений обмоток ЭМС. При выбранном размещении датчиков и линий связи воздействие помех от сигналов обмотки РF, НФС и ОН на измерительные каналы пренебрежимо мало, т. к. линии связи лежат в плоскости перпендикулярной виткам катушек РF, НФС и ОН. Переменное магнитное поле в этом случае может наводить ЭДС помехи только в замкнутом контуре, образуемом проводами измерительного канала, площадь которого в большинстве случаев пренебрежимо мала.

На рис. 6.2 показан канал измерения температуры болтовых соединений обмоток ЭМС. Оценим величину ЭДС помехи, создаваемой обмоткой ТF.

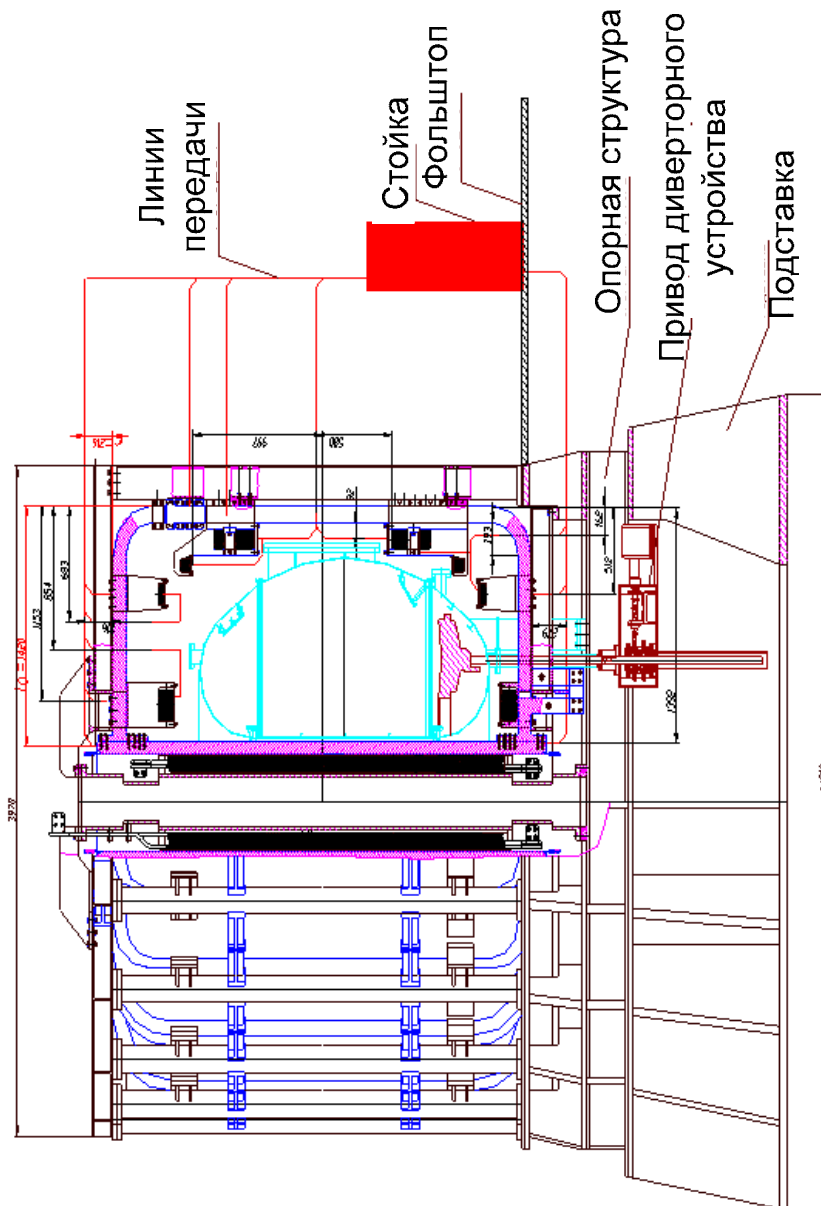


Рис. 6.1. Размещение кабельных термопар КТХА (ХК) на болтовых соединениях обмоток ЭМС для одного сектора вакуумной камеры ТОКАМАКА КТМ

Величина электромагнитной помехи, наводимой в термопарном кабеле, пропорциональна площади замкнутого контура, через который проходят силовые линии магнитного поля. В рассматриваемом измерительном канале исключен контур связи через землю (рассматриваемые элементы камеры ТОКАМАКА КТМ и термопара не заземлены). Исключение паразитного контура, возникающего за счет гальванической связи между землей датчика и землей платы сбора данных, позволяет снизить амплитуду помехи на 3–4 порядка. Для приведенного на рис. 6.2 измерительного канала, электромагнитная помеха будет наводиться только в контуре, образуемом проводами термопарного кабеля. Рассчитаем вели-

чину ЭДС наводимую в этом контуре. Площадь замкнутого контура для рассматриваемых участков термопарного кабеля вычислим по формуле

$$S_i = l_i \delta, \quad (1)$$

где  $\delta$  – расстояние между проводниками;  $l_i$  – длина параллельного виткам катушки участка термопарного кабеля.

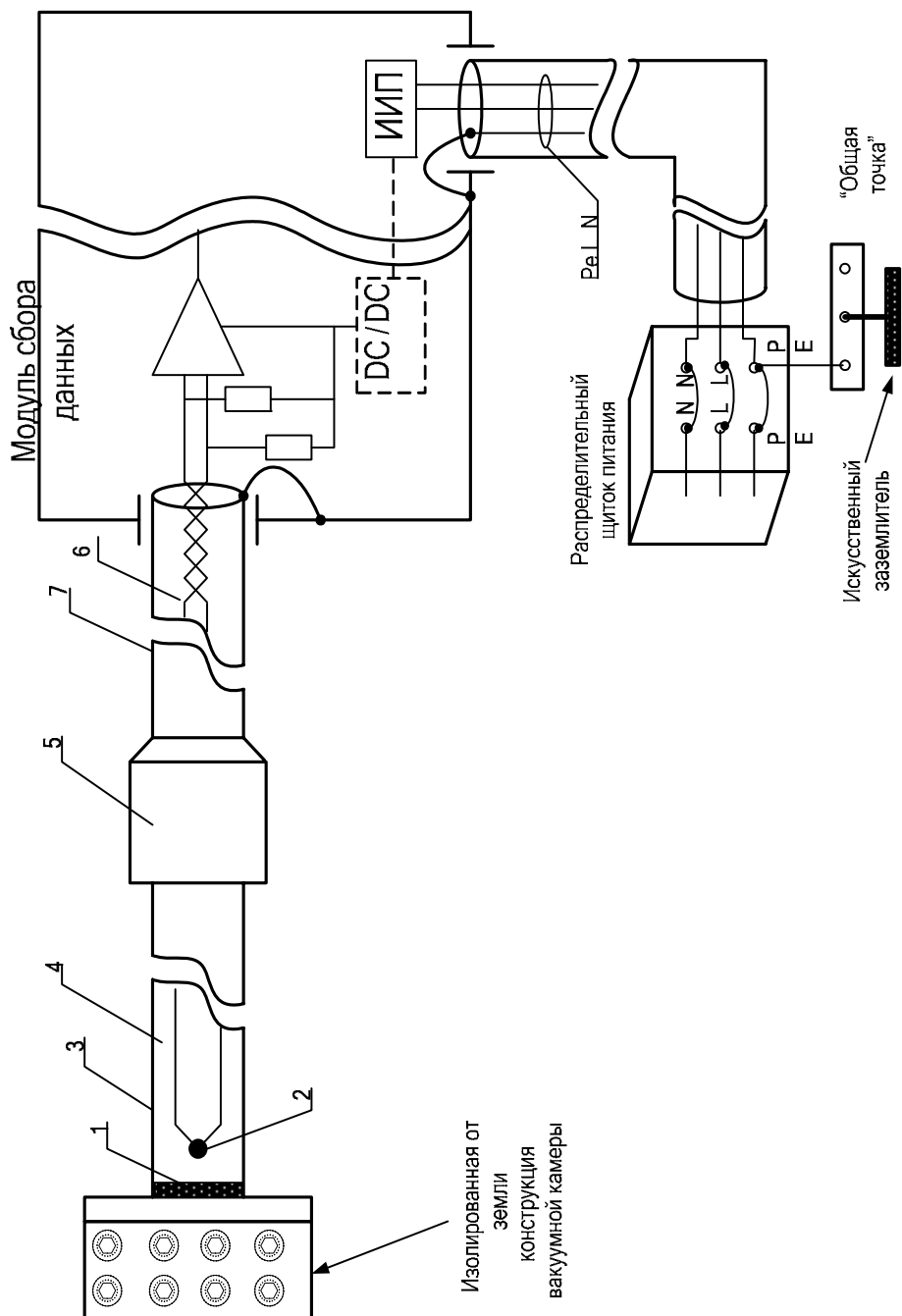


Рис. 6.2. Канал измерения температуры болтовых соединений обмоток ЭМС:

1 – стальная пробка; 2 – рабочий спай (изолированный); 3 – стальная оболочка;

4 – минеральная изоляция; 5 – герметичная переходная втулка;

6 – компенсационные провода; 7 – экран компенсационных проводов;

ИИП – импульсный источник питания

Учитывая  $\delta = 1$  мм,  $l_a = 1420$  мм (рис. 6.1), получим  $S_a = 1,420 \cdot 10^{-3} = 1,42 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2$ . Без учета экранирования, наведенная ЭДС составит

$$E_a = \frac{\mu_0}{2\pi} \frac{\delta l_a}{r} \frac{\Delta I_{\max}}{\Delta t},$$

где  $r$  – расстояние между термопарным кабелем и параллельным участком обмотки ТФ;  $\Delta I_{\max}$  – максимальная амплитуда пульсаций тока в обмотке ТФ,  $\Delta I_{\max} = 540 \text{ А}$  (вычисляется из условия  $|\delta B_t| \leq 1\%$ , что достигается при амплитуде пульсаций  $|\delta I_{OH}| \leq 1\%$ , где  $I_{OH}^{\max} = 54 \text{ кА}$ );  $\Delta t$  – период пульсаций,  $\Delta t \sim 1$  мс (24-пульсный источник питания);

$$E_a = \frac{4 \cdot 10^{-7}}{2\pi} \frac{10^{-3} \cdot 1,42 \cdot 540}{0,1 \cdot 10^{-3}} \approx 5 \text{ мкВ}.$$

Степень магнитного экранирования  $H$  для термопарного кабеля со стальной оболочкой толщиной  $t = 0,1$  мм, внешним радиусом  $R = 1,5$  мм, относительной магнитной проницаемостью  $\mu_r = 1000$  составит:

$$H[\text{Дб}] = 20 \log \left( \frac{\mu_r t}{2R} \right) = 20 \log \left( \frac{1000 \cdot 0,1}{2 \cdot 1,5} \right) = 34 \text{ Дб},$$

т. е. обеспечит ослабление помехи в  $K = 1/33$  раз.

$$E_a^{\circ} = \kappa E_a = \frac{1}{33} \cdot 5 \text{ мкВ} \approx 0,15 \text{ мкВ}.$$

При наличии контура заземления между датчиком и платой сбора данных, наведенная на этом контуре ЭДС будет превосходить рассчитанную величину на 3–4 порядка.

Помимо рассмотренного выше эффекта воздействия электромагнитной помехи помеха в измерительном канале может возникнуть в результате наличия паразитных емкостей между проводами и проводящими материалами, принадлежащим разным токовым контурам. Основными путями снижения емкостного влияния в этом случае являются скручивание проводников и экранирование линии передачи сигнала. При этом экран, как правило, соединяется с одной стороны с проводом системы опорного потенциала.

Другим источником помех может являться гальваническое влияние токов, протекающих по стальной оболочке термопарного кабеля на землю при наличии высокого потенциала в точке крепления термопары на вакуумной камере и выполнении защитного заземления со стороны системы сбора данных. Для снижения этой помехи можно либо не подключать экран к защитному заземлению системы сбора данных, либо использовать при этом разделительный конденсатор.



Помимо рассмотренных аппаратурных методов снижения влияния электромагнитных помех, таких как экранирование, заземление и рациональная прокладка линий передачи сигналов, эффективным методом снижения помех при измерении температуры является фильтрация. Динамика измерения температуры конструктивных элементов составляет, как правило, 0-10Гц, в то время как большинство помех лежат в более высокочастотной области. В соответствии с этим, для устранения влияния этих помех очень эффективно использовать цифровой фильтр нижних частот с полосой пропускания 0–10 Гц.

## 7. СТРУКТУРА ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ

Для систем автоматизации масштаба САЭ КТМ особую актуальность приобретает вопрос проектирования структуры программного обеспечения (ПО), поскольку программное обеспечение, наряду со структурными и техническими решениями, в наибольшей мере определяет уровень информационной эффективности и высокие эксплуатационные характеристики САЭ.

Учитывая сложность и большие размеры САЭ, была рассмотрена возможность использования современных подходов к разработке ПО, применяемых в настоящее время при создании автоматизированных систем управления технологическими процессами, в частности, базирующихся на применении SCADA-систем. Здесь необходимо отметить, что встроенных возможностей любой SCADA-системы при создании ПО САЭ КТМ, как впрочем, и при создании любой другой АСНИ, в целом недостаточно. Это связано с рядом причин: во-первых, процесс функционирования АСНИ, в отличие от АСУТП, обычно не подчиняется четко заданному технологическому регламенту, а определяется постоянно меняющейся программой экспериментов (или испытаний). Во-вторых, потоки информации, циркулирующие в АСНИ, характеризуются более высокой интенсивностью и неоднородностью по сравнению с АСУТП.

В то же время вышесказанное не относится к системам вакуумно-технологической подготовки, работающим непрерывно в течение длительных интервалов времени. Протекающие при этом процессы в основном имеют невысокие скорости. Постоянные времени управляемых процессов на подготовительном этапе составляют не менее 0,1 с. Отсюда следует, что информационные потоки в САЭ при выполнении подготовительных операций вполне могут быть обработаны средствами современной SCADA-системы.

Исходя из этого, был рассмотрен вариант адаптации отечественной SCADA-системы ТРЕЙС МОУД версии 5 (пр-во AdAstra Research Group, г. Москва) в составе программного обеспечения САЭ. Выбор SCADA-системы в данном случае был основан на имеющемся у авторов опыте по использованию ТРЕЙС МОУД в ряде проектов АСУТП, а также хорошем знании архитектуры системы, возможностей по ее интеграции с другими программами и нестандартными устройствами посредством внешних драйверов.

На рис. 7.1 представлена структура программного обеспечения в привязке к комплексу технических средств СУТП. В основу ПО подсист-

тем вакуумно-технологической подготовки положены исполнительные модули системы ТРЕЙС МОУД: монитор реального времени (МРВ), микроМРВ, NetLinkМРВ. На первом уровне системы автоматизации в основном предполагается использование малоканальных контроллеров типа ADAM-5000, установленных рядом с соответствующим технологическим оборудованием КТМ (ПСУ СВО, СПРК, СВВО) и непосредственно связанных с датчиками и исполнительными механизмами технологических систем (ТС), а также с аналитическими приборами и специальными приводами, используемыми в данных системах. Эти контроллеры имеют встроенное программное обеспечение, располагаемое в ПЗУ, и не требуют специального программирования. Управление малоканальными контроллерами выполняется дистанционно при помощи достаточно мощного компьютера в промышленном исполнении, расположенного в стойке общего управления процессом вакуумно-технологической подготовки рабочей камеры. Стойка включает в свой состав монитор, предназначенный для настройки программного обеспечения в процессе пуско-наладочных работ, а в режиме работы САЭ для концентрации данных и наблюдения за ходом технологических процессов. Отображение и регистрация технологической информации, а также ввод команд, выполняется в этом случае под управлением МРВ ТРЕЙС МОУД 5.11.

Подсистема управления подвижным диверторным и шлюзовым устройствами (ПДШУ) построена на основе промышленного контроллера с РС-архитектурой. Программное обеспечение контроллера построено на основе исполнительного модуля МикроМРВ, для работы которого необходима операционная система MSDOS<sup>1</sup>. Контроллер не имеет в своем составе пульта оператора. Для управления операциями позиционирования диверторного стола и загрузкой/выгрузкой образцов предполагается использование планшетного РС с возможностью подключения в сеть САЭ при помощи RadioEthernet. Планшетный РС может использоваться также и для управления другими элементами СУТП в процессе наладки системы. При этом оператор может перемещаться по экспериментальному залу и визуально наблюдать за обработкой команд, задаваемых с пульта, исполнительными механизмами системы автоматизации. ПО планшетного компьютера построено на базе NetLinkМРВ. NetLinkМРВ не предназначен для непосредственного управления узлами системы автоматизации. Всю необходимую для работы информацию он получает от других МРВ при помощи запросов по сети.

---

<sup>1</sup> Все другие МРВ работают под управлением Windows 2000.

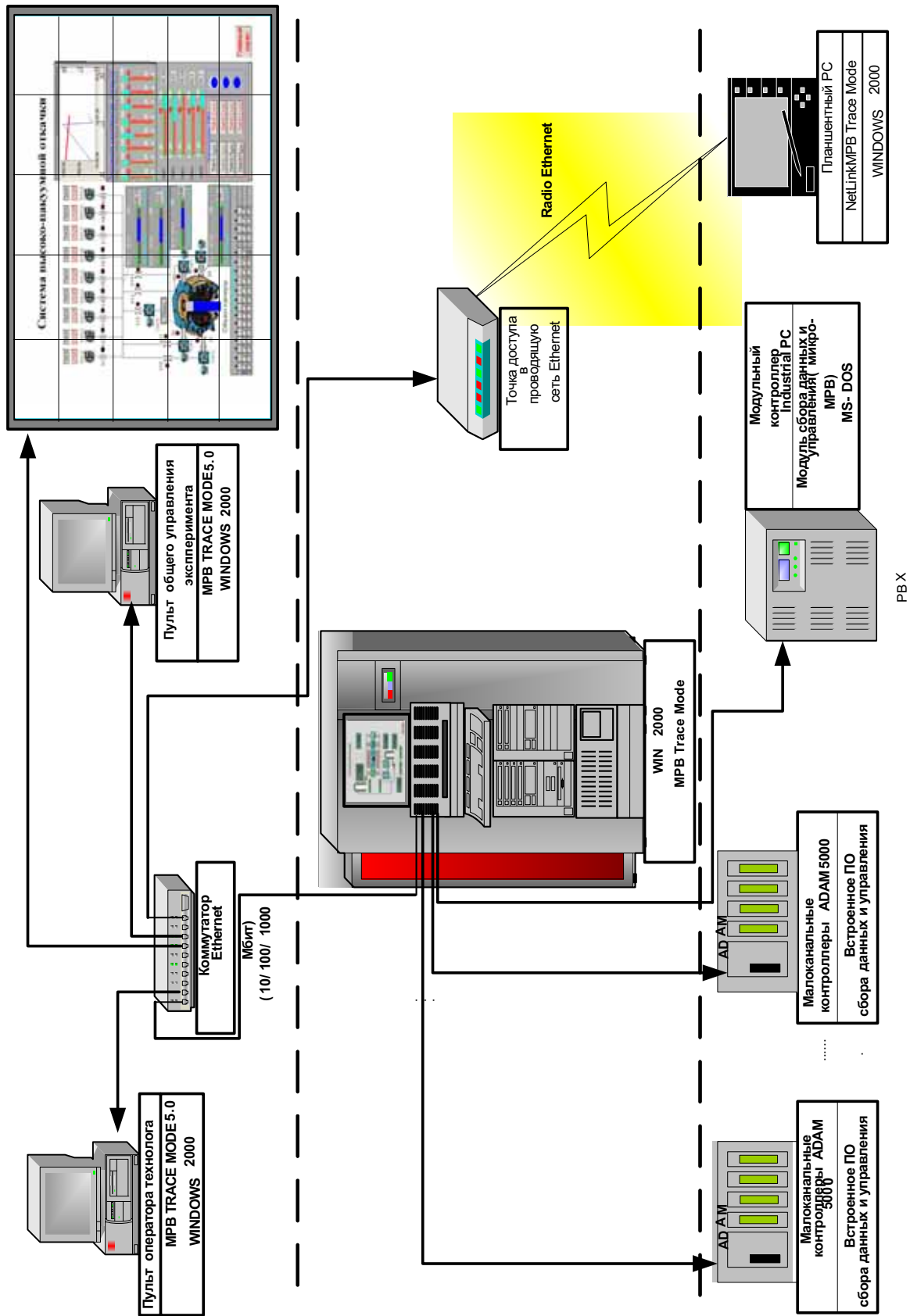


Рис. 7.1. Структура программного обеспечения

Отображение и регистрация технологической информации, а также ввод команд оператора в пусковом режиме работы САЭ выполняется под управлением МРВ, функционирующего на пульте оператора-технолога, расположенного на уровне III СУТП в пультовой САЭ КТМ. Этот пульт работает автономно в подготовительных режимах САЭ, а в пусковом режиме «разряд-пауза» – совместно с пультом общего управления экспериментом. Передача информации производится с использованием сети Ethernet.

Компьютер пульта общего управления экспериментом выполняет функции сервера доступа к оперативным данным, который обеспечивает временное согласование потоков информации от ПСУ технологических систем и информационно-измерительной системы. Данные, поступающие от подсистем, регистрируются по мере заполнения области памяти в архиве технологической информации с последующей его передачей в базу данных результатов испытаний ТОКАМАКа КТМ. Фактически сервер доступа к данным, создает условия для реализации алгоритмов централизованного управления установкой, а также оперативно-го анализа и обработки аварийных и предаварийных ситуаций. Последнее особенно важно, поскольку проведение разрядов в условиях даже незначительного отклонения работы какой-либо из систем ТОКАМАКа от штатного режима может привести к тяжелым авариям. Задачи анализа и обработки аварийных ситуаций решает отдельный программный модуль, взаимодействующий с сервером доступа к данным и формирующий аварийные сообщения на панели коллективного пользования (ПКП) САЭ. В отдельное поле ПКП также выводится основная информация о ходе процесса испытаний, которая включает общие параметры технологических систем и плазмо-физических процессов, протекающих в камере ТОКАМАКа.

Пульт общего управления экспериментом реализует алгоритм централизованного управления экспериментом с использованием МРВ ТРЕЙС МОУД версии 5.11. МРВ обеспечивает выполнение всех функций операторского интерфейса, выполнение команд пуска и останова технологических систем КТМ в процессе проведения подготовительных операций и рабочих циклов, запуск на исполнение программ экспериментов в автоматическом режиме с отображением технологической информации о процессе испытаний с заданным временным шагом. Временной шаг определяется возможностями оператора СУТП по восприятию информации и напрямую связан со скоростью обновления информации в буфере оперативных данных пульта.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

### По блоку контроля перемещений диверторного стола (лазеры, ультразвуковые и радиолокационные уровнемеры)

1. Бурских П.В. и др. Радиолокационные импульсные уровнемеры // ПСУ. – 1996. – № 10.
2. Застрогин Ю.Ф. и др. Лазерные приборы вибрационного контроля и точного позиционирования. – М.: Машиностроение, 1995. – 320 с.
3. Иванов В.А., Привалов В.Е. Применение лазеров в приборах точной механики. – СПб.: Политехника, 1993. – 217 с.
4. Привалов В.Е. Газоразрядные лазеры в измерительных комплексах. – Л.: Судостроение, 1989. – 260 с.
5. Привалов В.Е. Лазеры для систем управления // Приборы и системы управления. – 1997. – № 10. – С. 48–52.

### По гидроприводам

6. Власов С.Н., Черпаков Б.И. Справочник наладчика агрегатных станков и автоматических линий. – М.: Высшая школа, 1999. – 384 с.
7. Приводы и их элементы. Рынок продукции. Каталог-справочник / под общ. ред. А.Б. Чистякова. – М.: Машиностроение, 1995. – 432 с.
8. Свешников В.К., Усов А.А. Станочные гидроприводы. – М.: Машиностроение, 1988. – 512 с.
9. Сборочный чертёж КТМ.02.0000.0000.

### По электромеханическим приводам

10. А.с. 1292046 СССР, МКИ 4Н 01 F 7/18. Устройство для управления электромагнитом / А.В. Львицын, В.И. Мошкин.
11. А.с. 1309249 СССР, МКИ 4Н 02 Р 7/62. Устройство управления электромагнитным двигателем / А.В. Львицын, В.И. Мошкин.
12. Брускин Д.Э. и др. Электрические машины и микромашины. – М.: Высшая школа, 1990. – 528 с.
13. Баченис Д.С. и др. Электрические кабели, провода и шнуры: справочник / под общ. ред. Н.И. Белоруссова. – Изд. 3-е, перераб. – М.: Энергия, 1971.
14. Бихман Р.Н. и др. Испытания магнитного образца линейного электромагнитного двигателя // Электротехника. – 2000. – № 4. – С. 25–27.
15. Бихман Р.Н. и др. Линейный электромагнитный двигатель // Электротехника. – 1999. – № 7. – С. 56–61.

16. Болюх В.Ф. Влияние индуктивно-связанного контура на характеристики линейного импульсно-индукционного криогенного двигателя // Электротехника. – 2000. – № 5. – С. 1–6.
17. Болюх В.Ф. Исследование индукционно-динамического двигателя // Электротехника. – 2000. – № 10. – С. 28–35.
18. Болюх В.Ф. Электромеханический импульсно-индукционный ускоритель с криогенным охлаждением // Электротехника. – 2000. – № 8. – С. 45–52.
19. Гаранин А.Ю. Методы расчета динамических характеристик втяжного электромагнита постоянного тока // Электротехника. – 2001. – № 11. – С. 48–51.
20. Гаранин А.Ю. Расчет втяжного электромагнита постоянного тока // Электротехника. – 2000. – № 10. – С. 54–58.
21. Калантаров П.Л., Цейтлин Л.А. Расчёт индуктивностей. – Л.: Энергия, 1986.
22. Ключев В.И. Теория электропривода: учебник. – М.: Энергоатомиздат, 1998.
23. Копылов И.П. Математическое моделирование энергетических машин. – М.: Высшая школа, 2001. – 328 с.
24. Нестеренко В.А. и др. Новые изделия электромеханики на основе высокоэнергетических постоянных магнитов // Электротехника. – 2001. – № 11. – С. 19–21.
25. Ряшенцев Н.П., Ряшенцев В.Н. Электромагнитный привод линейных машин. – Новосибирск: Наука, 1985. – 356с.
26. Сайт кафедры автоматизированного электропривода Московского энергетического института [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://аер.mpei.ac.ru>.
27. Электропривод с линейными электромагнитными двигателями / Н.П. Ряшенцев, Г.Г. Угаров, В.Н. Федонин, А.Т. Малов. – Новосибирск: Наука 1981.

## ПРИЛОЖЕНИЕ А

### Ведомость и чертежи СУПП к Э

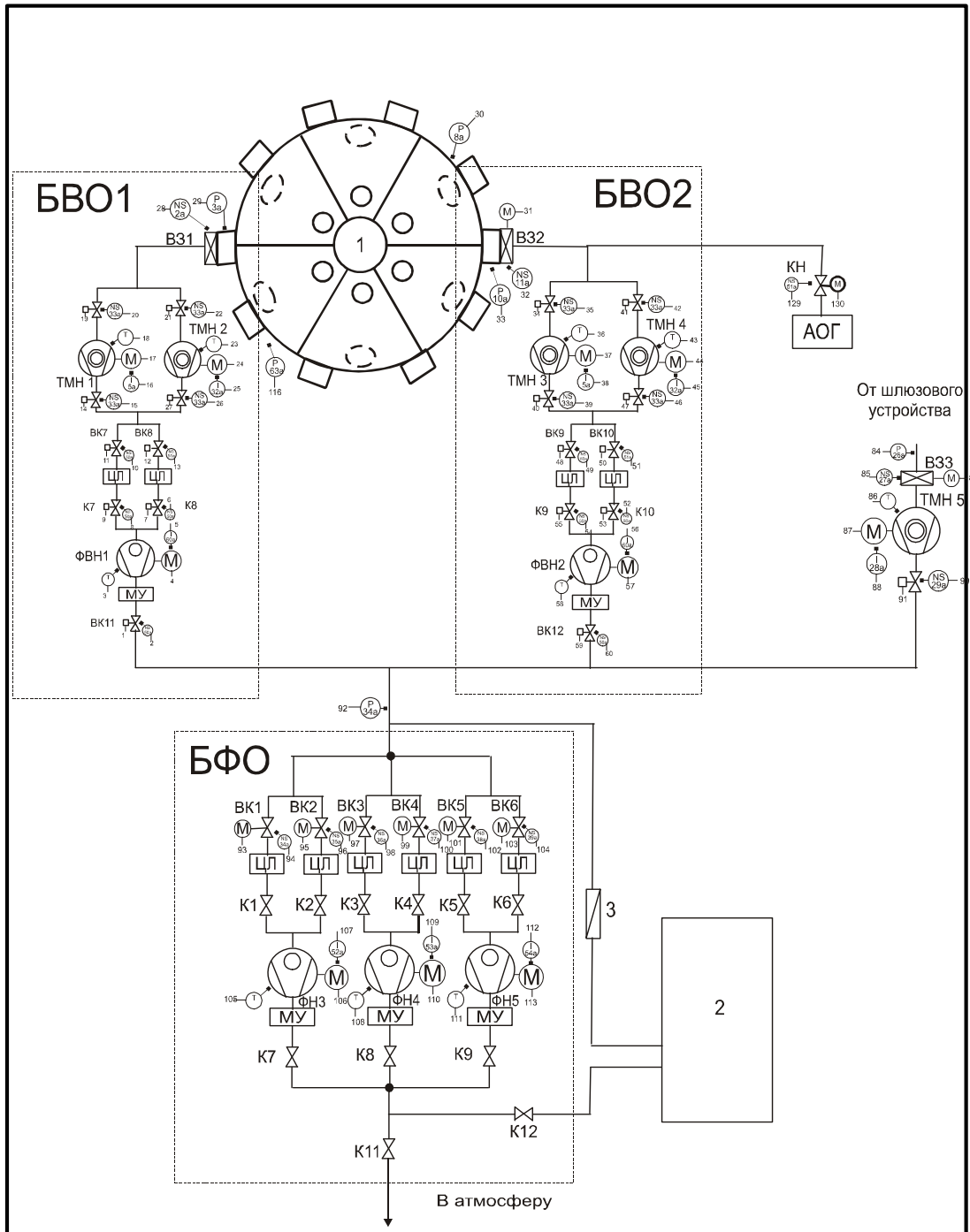
					<b>КТМ.03.001.</b>				
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>	<i>Подсистема управления процессом вакуумно-технологической подготовки рабочей камеры ТОКАМАКа КТМ к экспериментам</i>	<i>Лит.</i>		<i>Масса</i>	<i>Масштаб</i>
<i>Разраб.</i>		<i>Мезенцев АА</i>							
<i>Провер.</i>		<i>Паплов В.А.</i>							
<i>Т. Контр.</i>		<i>Ф.И.О.</i>				<i>Лист</i>	<i>1</i>	<i>Листов</i>	<i>35</i>
<i>Реценз.</i>		<i>Ф.И.О.</i>				<b>ТПУ</b>			
<i>Н. Контр.</i>		<i>Ф.И.О.</i>							
<i>Утверд.</i>		<i>Ф.И.О.</i>							



1	КТМ.03.001.001 Система высоковакуумной откачки
2	КТМ.03.001.002 Структурная схема подсистемы управления системой высоковакуумной откачки (СВВО) КТМ
3	КТМ.03.001.003 Алгоритм работы ПСУ СВВО
4	КТМ.03.001.004 Эскиз форм отображения информации на пульте оператора-технолога ПСУ СВВО
5	КТМ.03.001.005 Функциональная схема системы подготовки рабочей камеры КТМ
6	КТМ.03.001.006 Обобщенный алгоритм процесса ПРК
7	КТМ.03.001.007 Алгоритм очистки рабочей камеры
8	КТМ.03.001.008 Алгоритм боронизации
9	КТМ.03.001.009 Схема размещения устройств системы автоматизации процесса ПРК
10	КТМ.03.001.010 Структура комплекса технических средств системы автоматизации процесса ПРК
11	КТМ.03.001.011 Мнемосхема пульта оператора-технолога
12	КТМ.03.001.012 Функциональная схема автоматизации системы водяного охлаждения КТМ
13	КТМ.03.001.013 Структурно-функциональная схема системы водяного охлаждения КТМ
14	КТМ.03.001.014 Технологическая схема СПДШУ ТОКАМАКА КТМ
15	КТМ.03.001.015 Схема алгоритма функционирования подсистемы управления СПДШУ ТОКАМАКА КТМ.
16	КТМ.03.001.016 Алгоритм операции выгрузки сменного элемента с последующей загрузкой нового элемента
17	КТМ.03.001.017 Структурная схема гидравлического привода шлюзовой камеры КТМ
18	КТМ.03.001.018 Схема контроля вертикального и радиального положения диверторного стола
19	КТМ.03.001.019 Алгоритм управления вращением диверторного стола.
20	КТМ.03.001.020 Алгоритм управления вертикальным перемещением диверторного стола
21	КТМ.03.001.021 Структурная схема блока управления приводами подъема/вращения ПДУ
22	КТМ.03.001.022 Структурно-функциональная схема подсистемы управления СПДШУ
23	КТМ.03.001.023 Структура технических средств системы управления ПДШУ
24	КТМ.03.001.024 Чертеж графического интерфейса подсистемы управления ПДШУ
Ведомость чертежей СУПП к Э	
Изм	Лист
№ доквм.	Подпи
Дат	Лист
	2

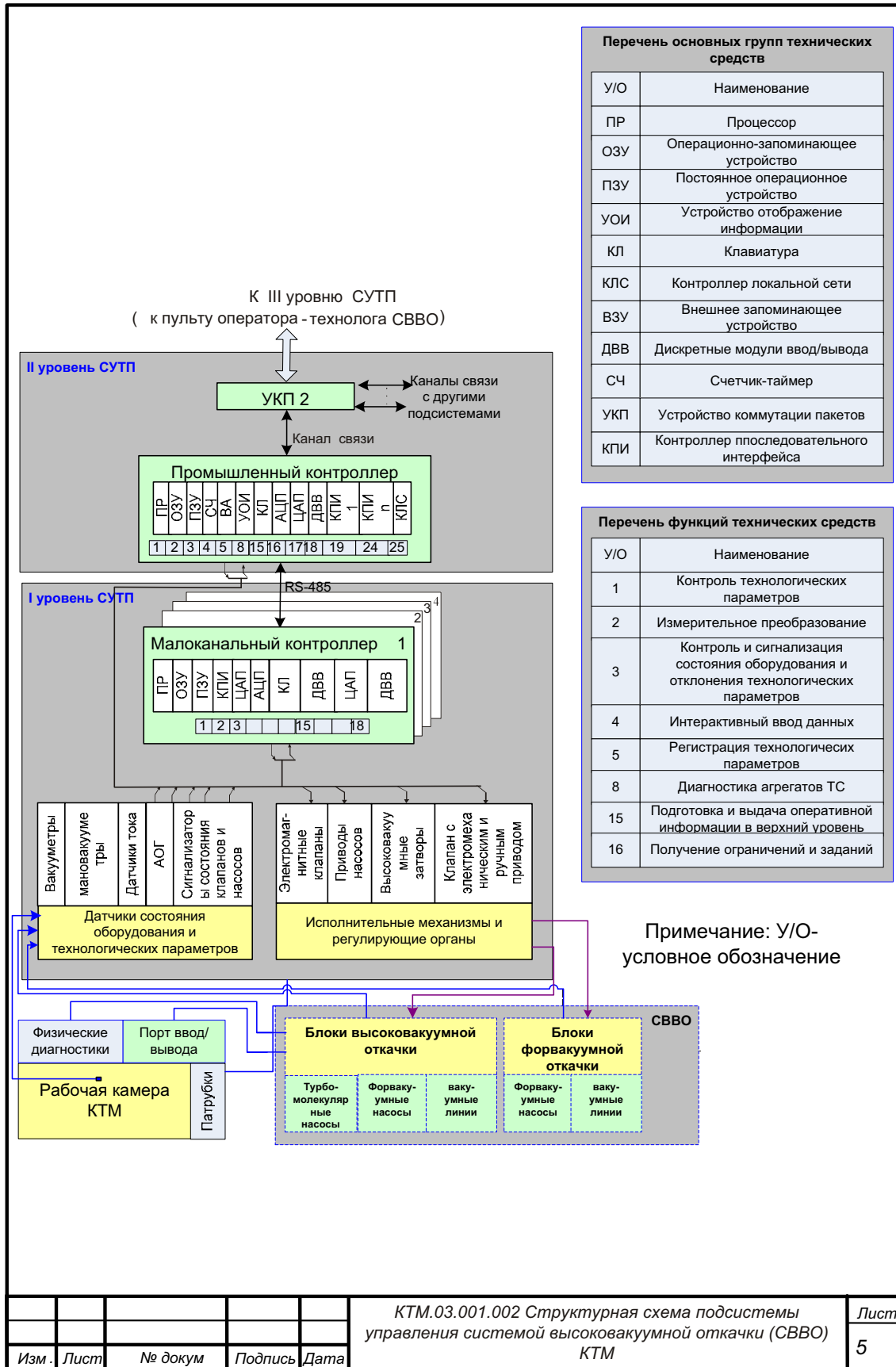
25	КТМ.03.001.025 Чертёж графического интерфейса подсистемы управления ПДШУ(Экран2)
26	КТМ.03.001.026 Структура комплекса технических средств систем управления процессом вакуумно-технологической подготовки рабочей камеры КТМ
27	КТМ.03.001.027 Схема размещения кабельных термопар
28	КТМ.03.001.028 Канал измерения температуры болтовых соединений обмоток ЭМС
29	КТМ.03.001.029 Схема распределения программных модулей в СУТП
30	КТМ.03.001.030 Схема заземления ТОКАМАКА КТМ
31	КТМ.03.001.031 Схема размещения оборудования в пультовой САЭ
32	КТМ.03.001.032 Структурная схема программного обеспечения СУТП ТОКАМАКА КТМ

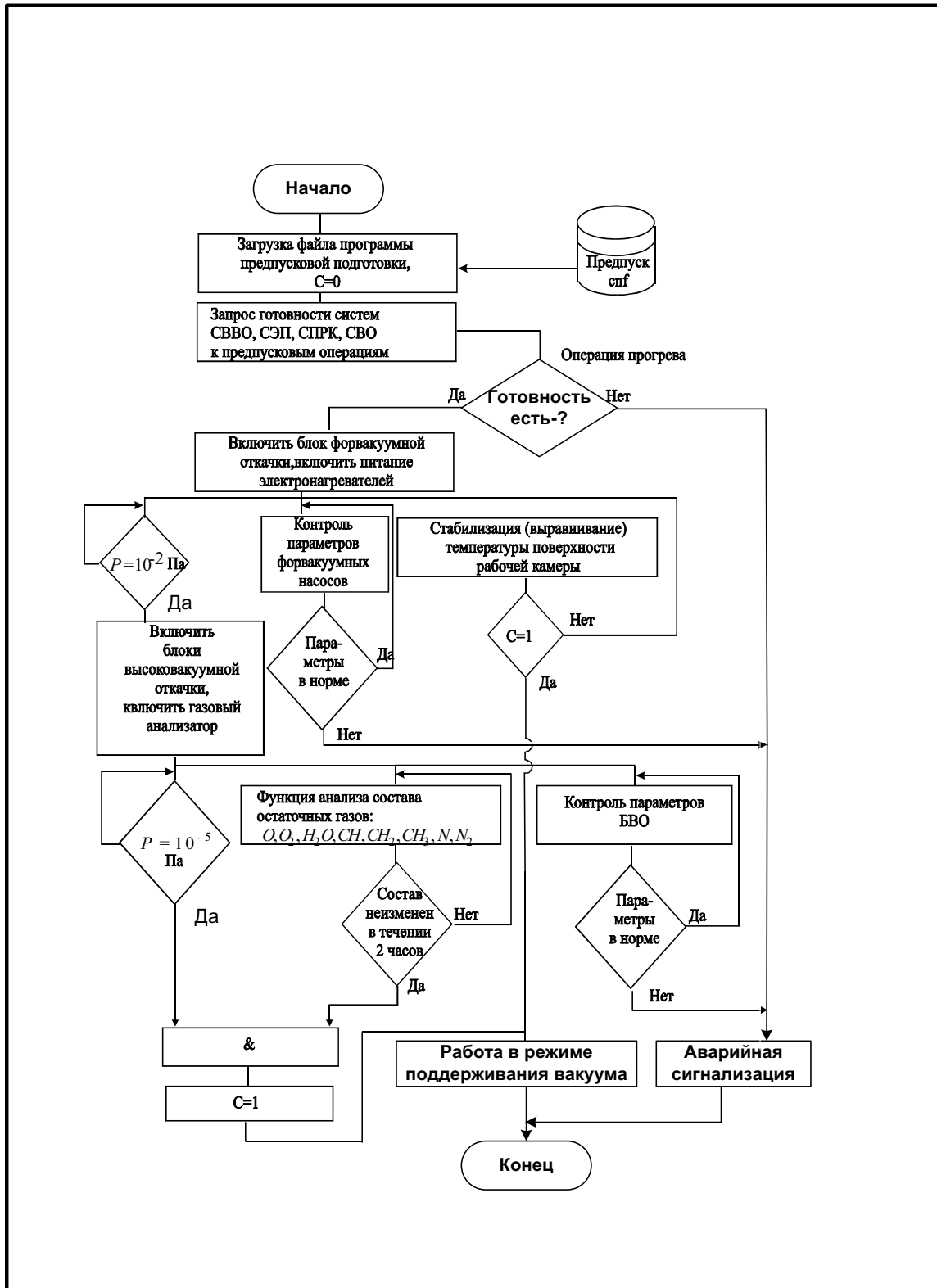
					<i>Ведомость чертежей СУПП к Э</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпи</i>	<i>Дат</i>		3



1- торoidalная камера; 2- очистка вредных примесей;  
 3- предохранительная мембрана;  
 В31-В33- Высоковакуумные затворы с электромеханическим приводом;  
 ВК1-ВК6- Вакуумные клапаны с электромеханическим и ручным приводами;  
 К1-К11 - Вакуумные клапаны с ручным приводом;  
 КН - Клапан натекатель; АОГ- Анализатор остаточного газа.

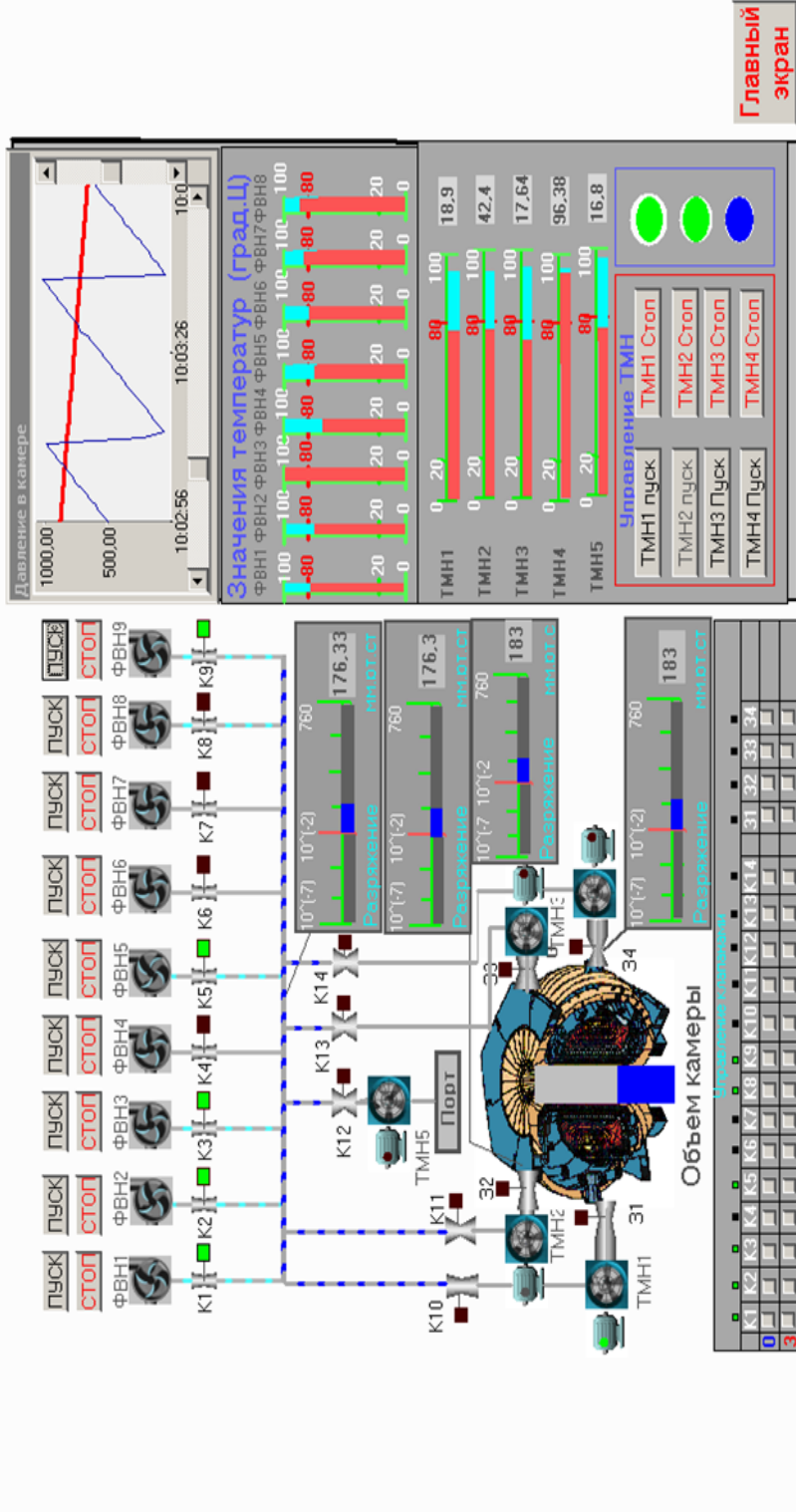
				<i>КТМ.03.001.001 Система высоковакуумной откачки</i>		Лист 4
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		



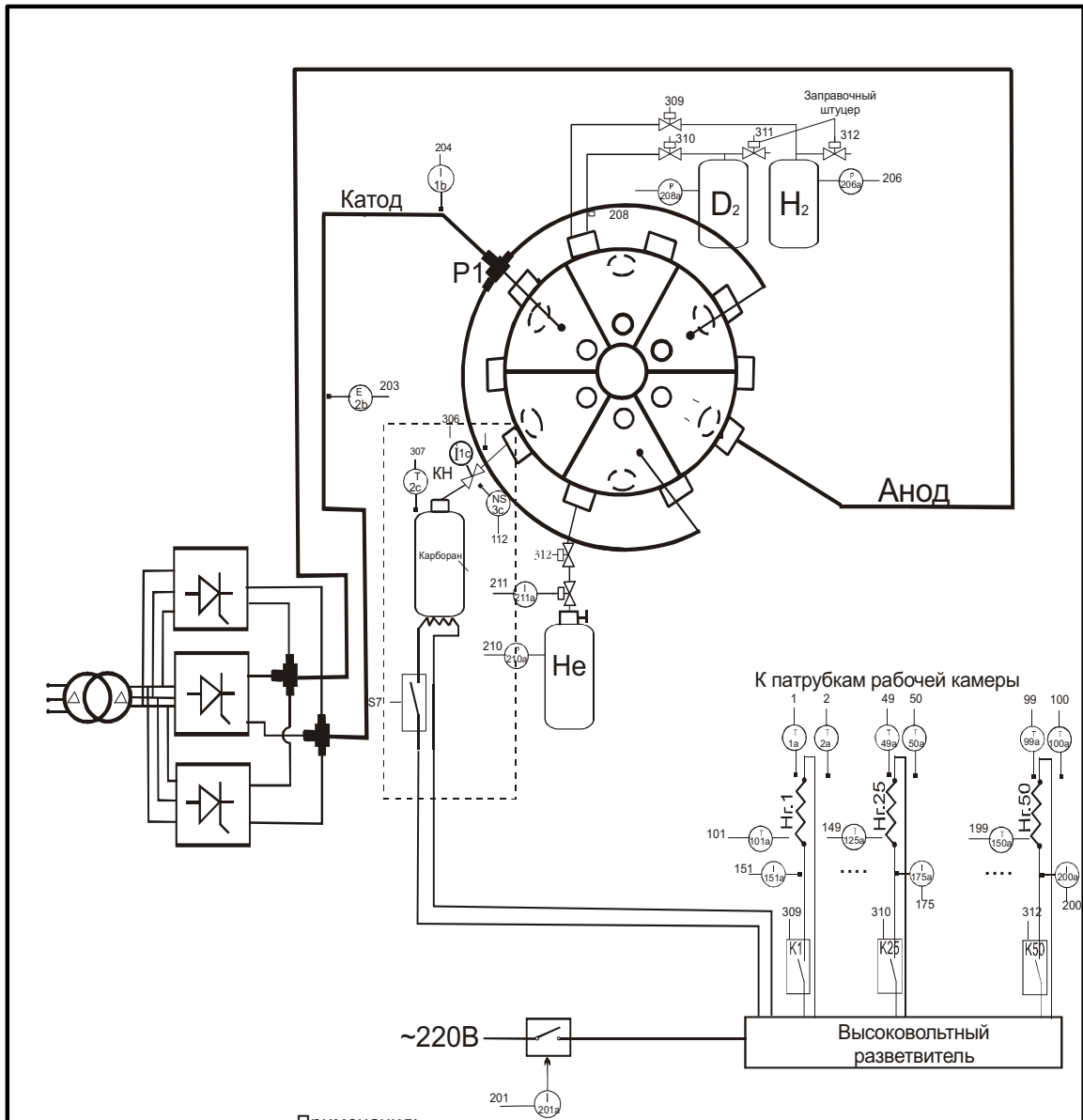


				КТМ.03.001.003 Алгоритм работы ПСУ СВВО		Лист
Изм.	Лист	№ докум	Подпись	Дата	6	

# Система высоко-вакуумной откачки



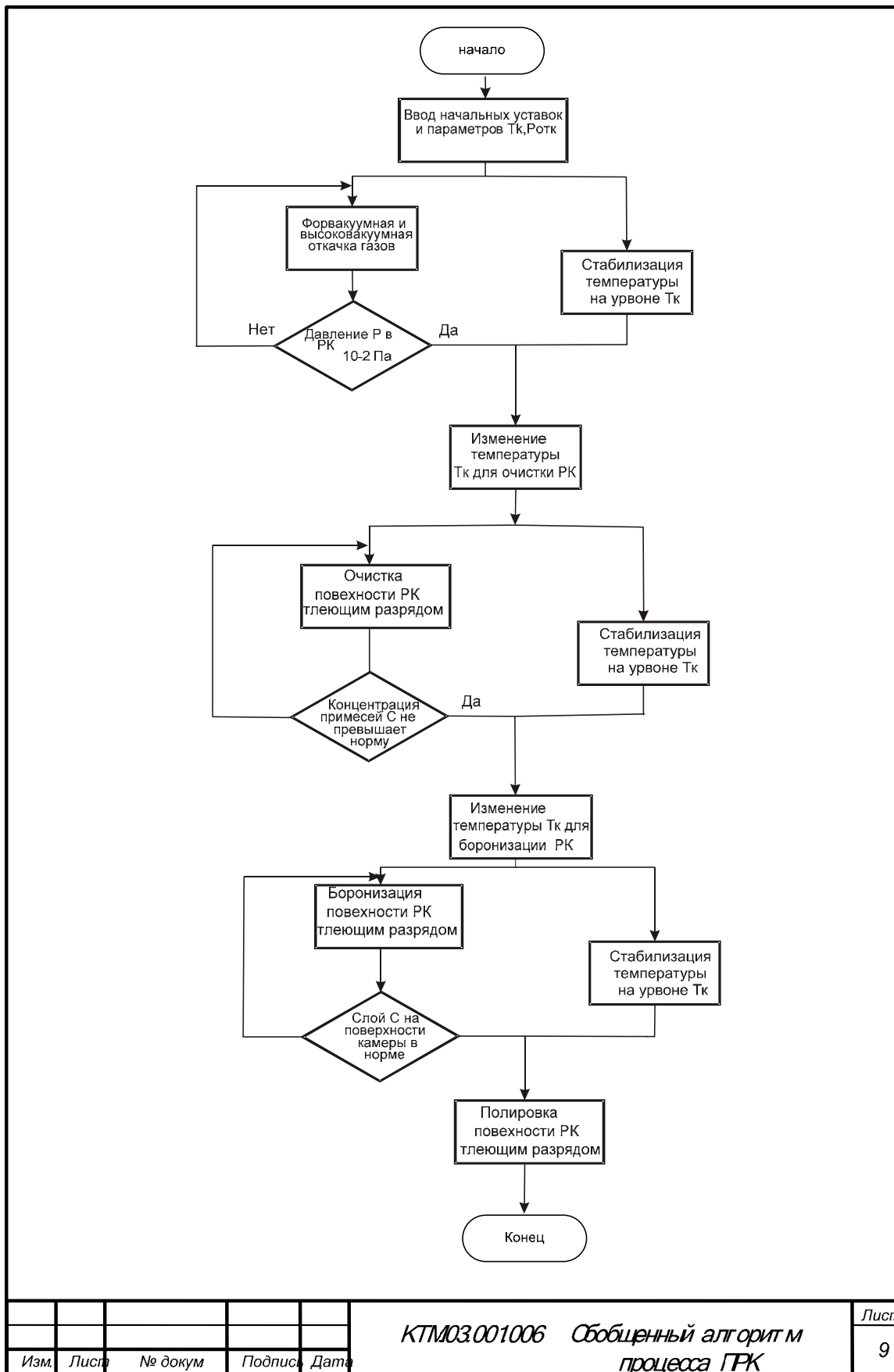
Изм.	Лист	№ докум	Подпись	Дата	КТМ.03.001.004 Эскиз форм отображения информации на пульте оператора технолога ПСУ СВВО	Лист
						7



**Примечания:**

- КН- клапан натекатель;
- УБ - Устройство боронизации;
- Нг.1-Нг.50 Электронагреватели;
- К1-К50 - Переключатели высоковольтные;
- Р1,Р2 - Разветвители цепей анода и катода;
- Тр1 - Трансформатор напряжения;
- ТП1 Тиристорный преобразователь.

				<i>КТМ03.001.005 Функциональная схема системы подгот овки рабочей камеры КТМ</i>		Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	8	



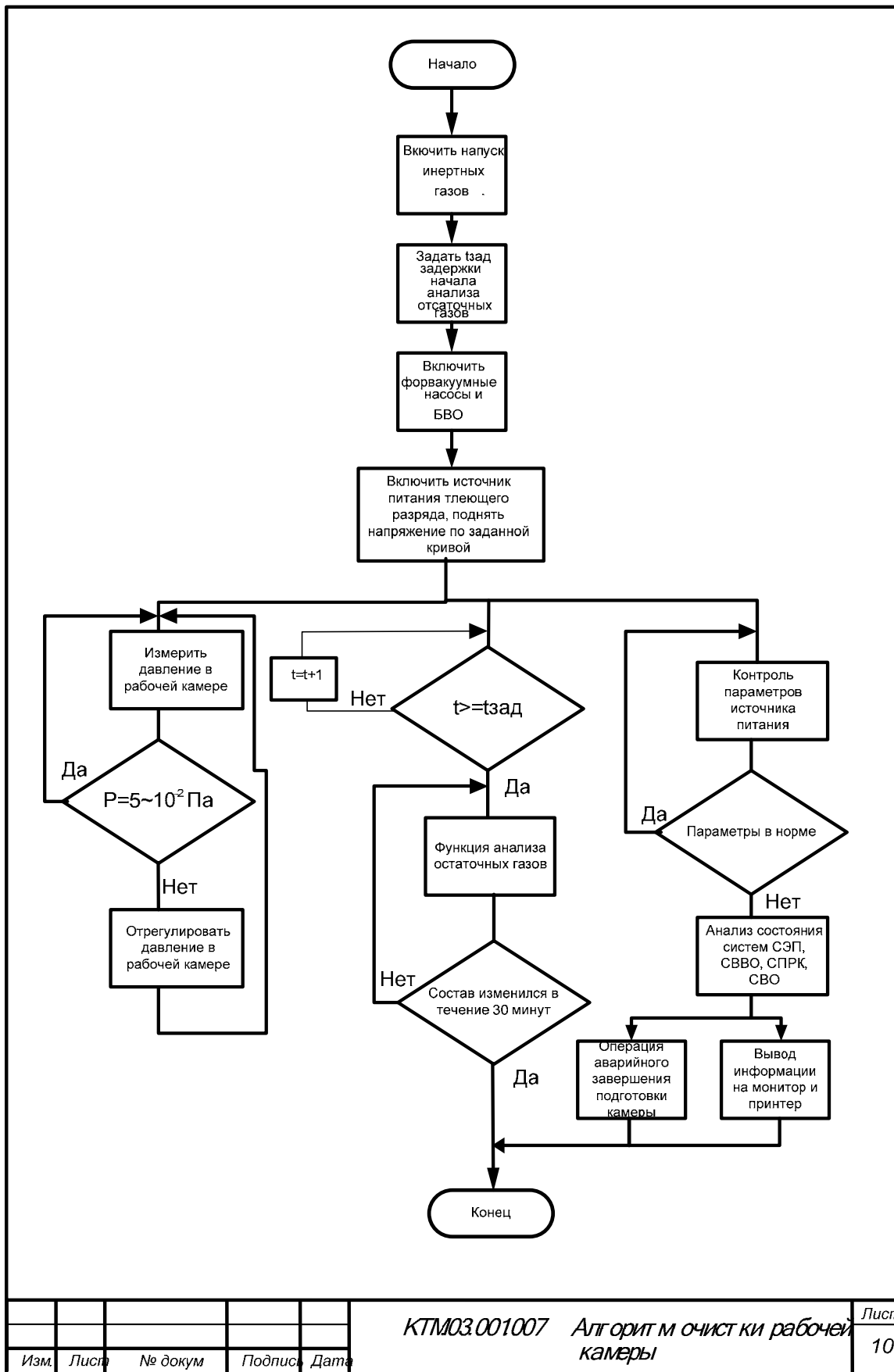
КТМ03.001006 *Обобщенный алгоритм процесса ГРК*

Лист

9

Изм. Листа № докум Подпись Дата



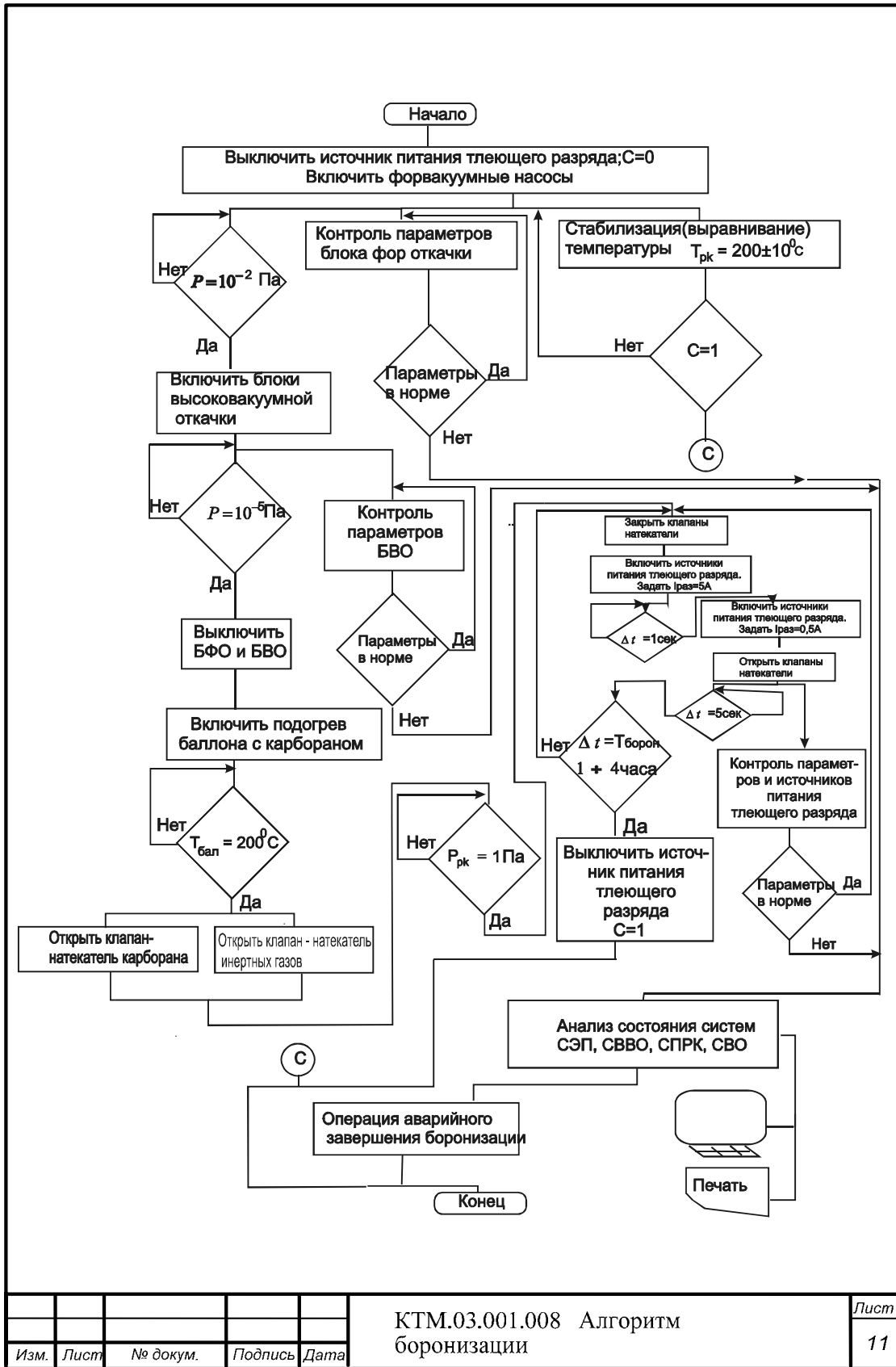


КТМОЗ.001007 Алгоритм очистки рабочей камеры

Лист

10

Изм. Лист № докум. Подпись Дата

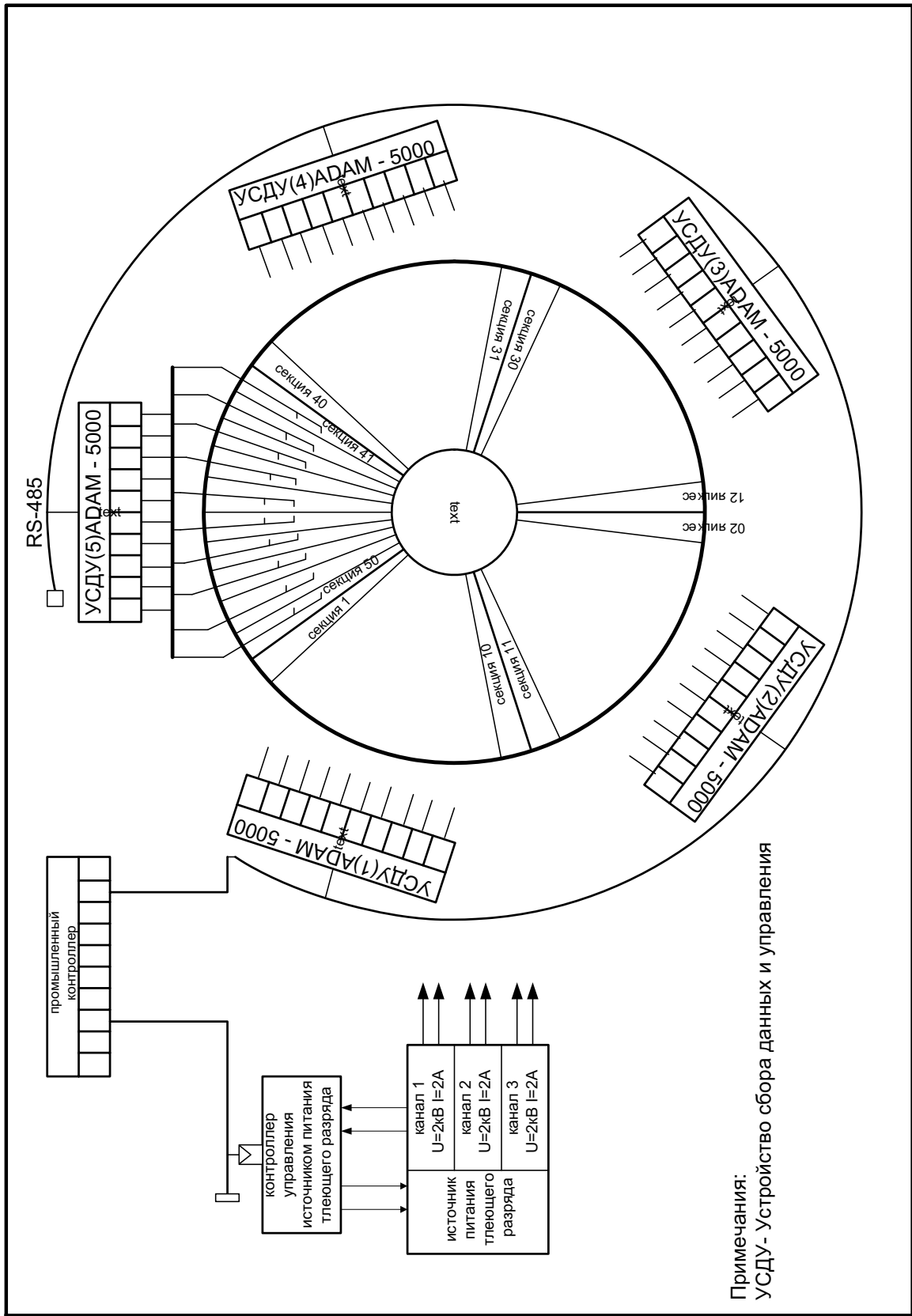


КТМ.03.001.008 Алгоритм боронизации

Лист

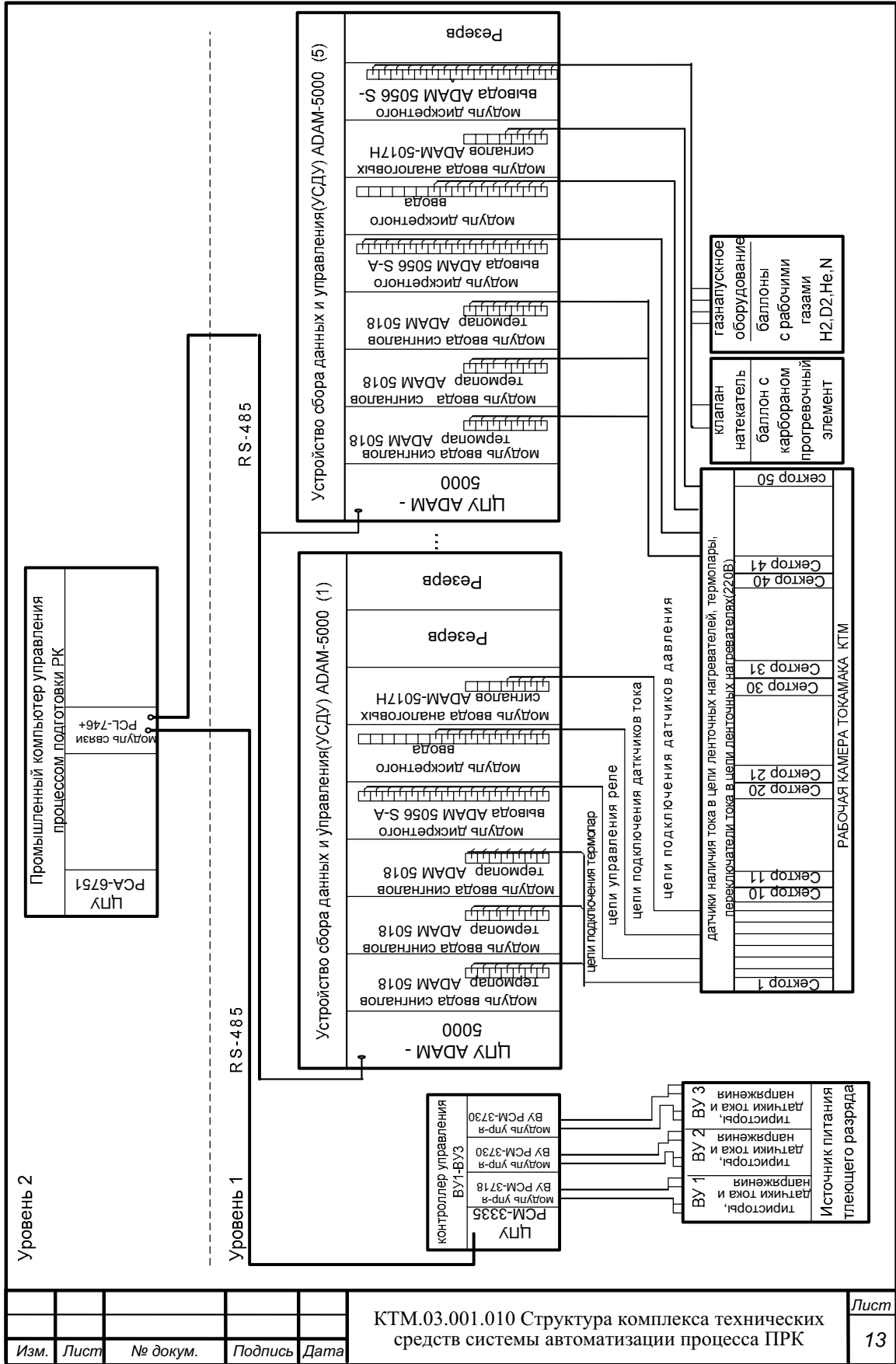
Изм. Лист № докум. Подпись Дата

11



Примечания:  
 УСДУ- Устройство сбора данных и управления

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	КТМ03.001.009 Схема размещения устройств в системе автоматизации процесса ГРК	Лист
						12



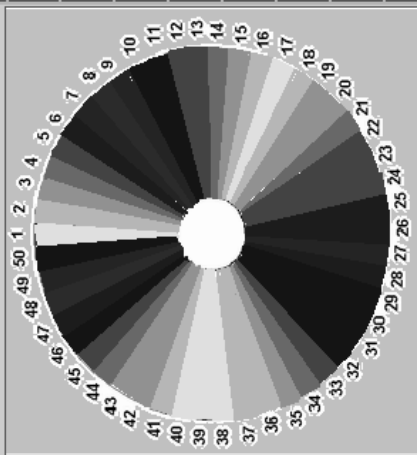
КТМ.03.001.010 Структура комплекса технических средств системы автоматизации процесса ПРК

Лист

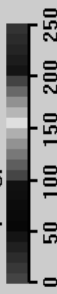
13

Изм. Лист № докум. Подпись Дата

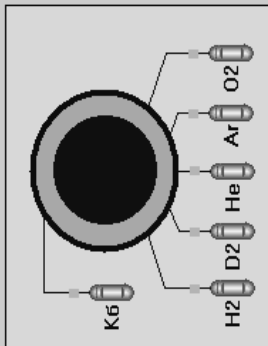
# Система подготовки рабочей камеры



Температурный диапазон



№	Темп.	№	Темп.	№	Темп.	№	Темп.	№	Темп.
1	150,4	11	200,4	21	185,5	31	200,8	41	165,5
2	150,2	12	200,0	22	185,2	32	200,9	42	165,8
3	163,7	13	197,9	23	193,4	33	200,7	43	171,9
4	163,4	14	197,6	24	193,7	34	195,2	44	171,1
5	171,7	15	191,8	25	198,0	35	187,0	45	178,8
6	172,0	16	191,8	26	198,3	36	187,1	46	178,6
7	185,4	17	185,7	27	199,9	37	186,4	47	186,6
8	185,5	18	185,6	28	199,9	38	187,1	48	186,6
9	198,5	19	177,1	29	210,3	39	178,1	49	190,7
10	199,0	20	177,8	30	210,4	40	178,8	50	191,0
11	210,6	1	165,8	31	212,1	1	169,3	1	201,8
12	210,3	2	165,1	32	212,7	2	169,8	2	201,9
13	220,4	3	157,7	33	220,3	3	165,5	3	215,1
14	220,1	4	157,9	34	220,3	4	166,0	4	215,1
15	233,9	5	163,5	35	215,3	5	158,4	5	230,1
16	233,2	6	163,9	36	215,7	6	158,2	6	231,0
17	220,2	7	172,0	37	209,2	7	152,5	7	220,4
18	220,7	8	171,1	38	209,7	8	152,1	8	220,5
19	209,0	9	180,0	39	201,5	9	159,4	9	209,7
20	209,7	10	179,6	40	202,0	10	159,9	10	209,0



Ток на электроде 1: 5,1  
 Ток на электроде 2: 5,5  
 Ток на электроде 3: 5,4

Задать напряжение 1: 1500  
 Задать напряжение 2: 1500  
 Задать напряжение 3: 1500

ВКЛ Разряд ● Выкл Разряд

Состояние клапанов баллонов  
 Баллон H2   
 Баллон D2   
 Баллон He   
 Баллон Ar   
 Баллон O2

Давление в баллоне H2: 11,8

Давление в баллоне D2: 10,1

Давление в баллоне He: 11,7

Давление в баллоне Ar: 10,0

Давление в баллоне O2: 11,8

Давление в камере: 300,4

Темпер. карборана: 170,9

Включить нагреватель  
 Открыть клапан нагревателя  
 Включить нагреватель  
 Закрыть клапан нагревателя

Главный экран

## Состояние цепей электронагревателей

ЭН1	<input type="checkbox"/>	ток: 3,2	ЭН13	<input type="checkbox"/>	ток: 3,3	ЭН26	<input type="checkbox"/>	ток: 3,3	ЭН39	<input type="checkbox"/>	ток: 3,6
ЭН2	<input type="checkbox"/>	ток: 3,2	ЭН14	<input type="checkbox"/>	ток: 3,8	ЭН27	<input type="checkbox"/>	ток: 3,5	ЭН40	<input type="checkbox"/>	ток: 3,9
ЭН3	<input type="checkbox"/>	ток: 3,4	ЭН15	<input type="checkbox"/>	ток: 3,3	ЭН28	<input type="checkbox"/>	ток: 3,1	ЭН41	<input type="checkbox"/>	ток: 3,2
ЭН4	<input type="checkbox"/>	ток: 3,4	ЭН16	<input type="checkbox"/>	ток: 3,5	ЭН29	<input type="checkbox"/>	ток: 3,3	ЭН42	<input type="checkbox"/>	ток: 3,2
ЭН5	<input type="checkbox"/>	ток: 3,7	ЭН17	<input type="checkbox"/>	ток: 3,7	ЭН30	<input type="checkbox"/>	ток: 3,9	ЭН43	<input type="checkbox"/>	ток: 3,8
ЭН6	<input type="checkbox"/>	ток: 3,5	ЭН18	<input type="checkbox"/>	ток: 3,1	ЭН31	<input type="checkbox"/>	ток: 3,0	ЭН44	<input type="checkbox"/>	ток: 3,4
ЭН7	<input type="checkbox"/>	ток: 3,9	ЭН19	<input type="checkbox"/>	ток: 3,1	ЭН32	<input type="checkbox"/>	ток: 3,7	ЭН45	<input type="checkbox"/>	ток: 3,6
ЭН8	<input type="checkbox"/>	ток: 3,4	ЭН20	<input type="checkbox"/>	ток: 3,3	ЭН33	<input type="checkbox"/>	ток: 3,5	ЭН46	<input type="checkbox"/>	ток: 3,9
ЭН9	<input type="checkbox"/>	ток: 3,1	ЭН21	<input type="checkbox"/>	ток: 3,0	ЭН34	<input type="checkbox"/>	ток: 3,4	ЭН47	<input type="checkbox"/>	ток: 3,3
ЭН10	<input type="checkbox"/>	ток: 3,8	ЭН22	<input type="checkbox"/>	ток: 3,3	ЭН35	<input type="checkbox"/>	ток: 3,9	ЭН48	<input type="checkbox"/>	ток: 3,4
ЭН11	<input type="checkbox"/>	ток: 3,3	ЭН23	<input type="checkbox"/>	ток: 3,2	ЭН36	<input type="checkbox"/>	ток: 3,7	ЭН49	<input type="checkbox"/>	ток: 3,8
ЭН12	<input type="checkbox"/>	ток: 4,0	ЭН24	<input type="checkbox"/>	ток: 4,0	ЭН37	<input type="checkbox"/>	ток: 3,8	ЭН50	<input type="checkbox"/>	ток: 3,9
ЭН25	<input type="checkbox"/>	ток: 3,2	ЭН38	<input type="checkbox"/>	ток: 3,6						

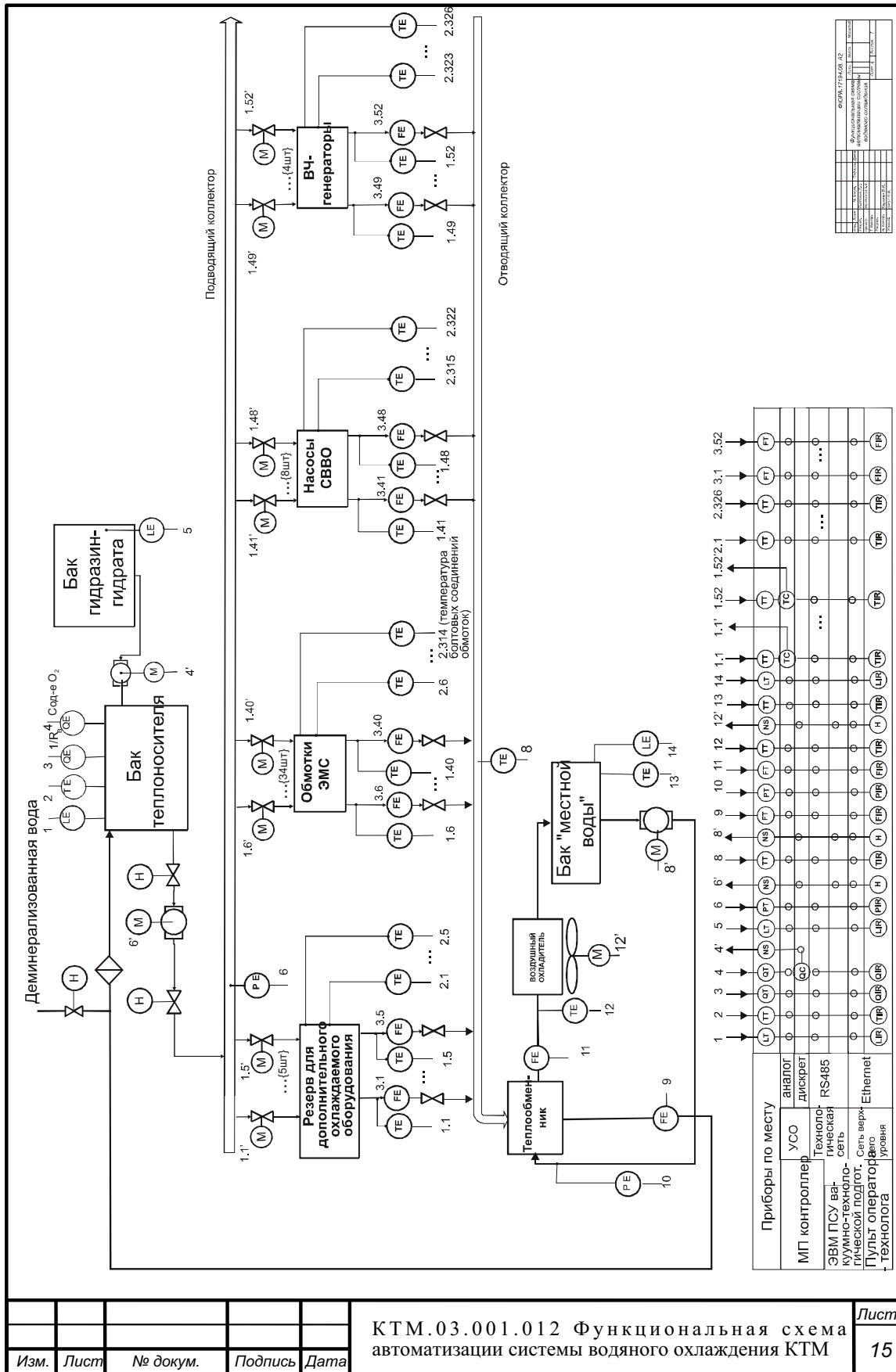
Включить общее питание  
 Выключить общее питание

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

КТМО3.001011 Мнемосхема пульта оператора  
 - технолога

Лист

14



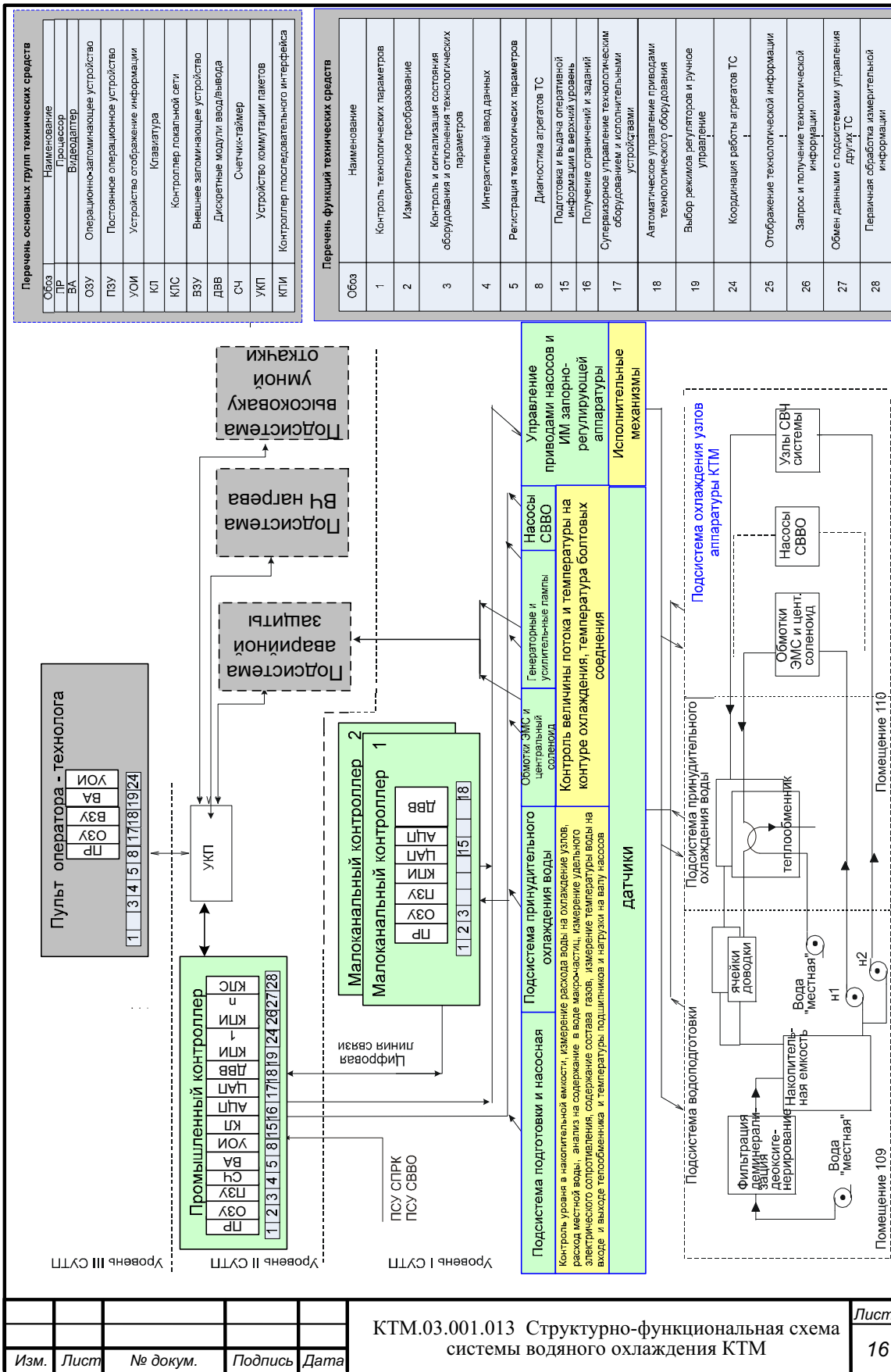
Приборы по месту	УСО	аналог	дискрет	1	2	3	4	5	6	8	8'	9	10	11	12	12'	13	14	14'	1.1	1.1'	1.52	1.52'	2.326	3.1	3.52
МП контроллер	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
ЭВМ ПСУ ва-куумно-технологической подлог.	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
Пульт оператора	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
Технолог	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
Сеть верхнего уровня	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
Сеть нижнего уровня	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○

ИЗДАНИЕ	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	
ИЗДАНИЕ																															

КТМ.03.001.012 Функциональная схема автоматизации системы водяного охлаждения КТМ

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

Лист 15

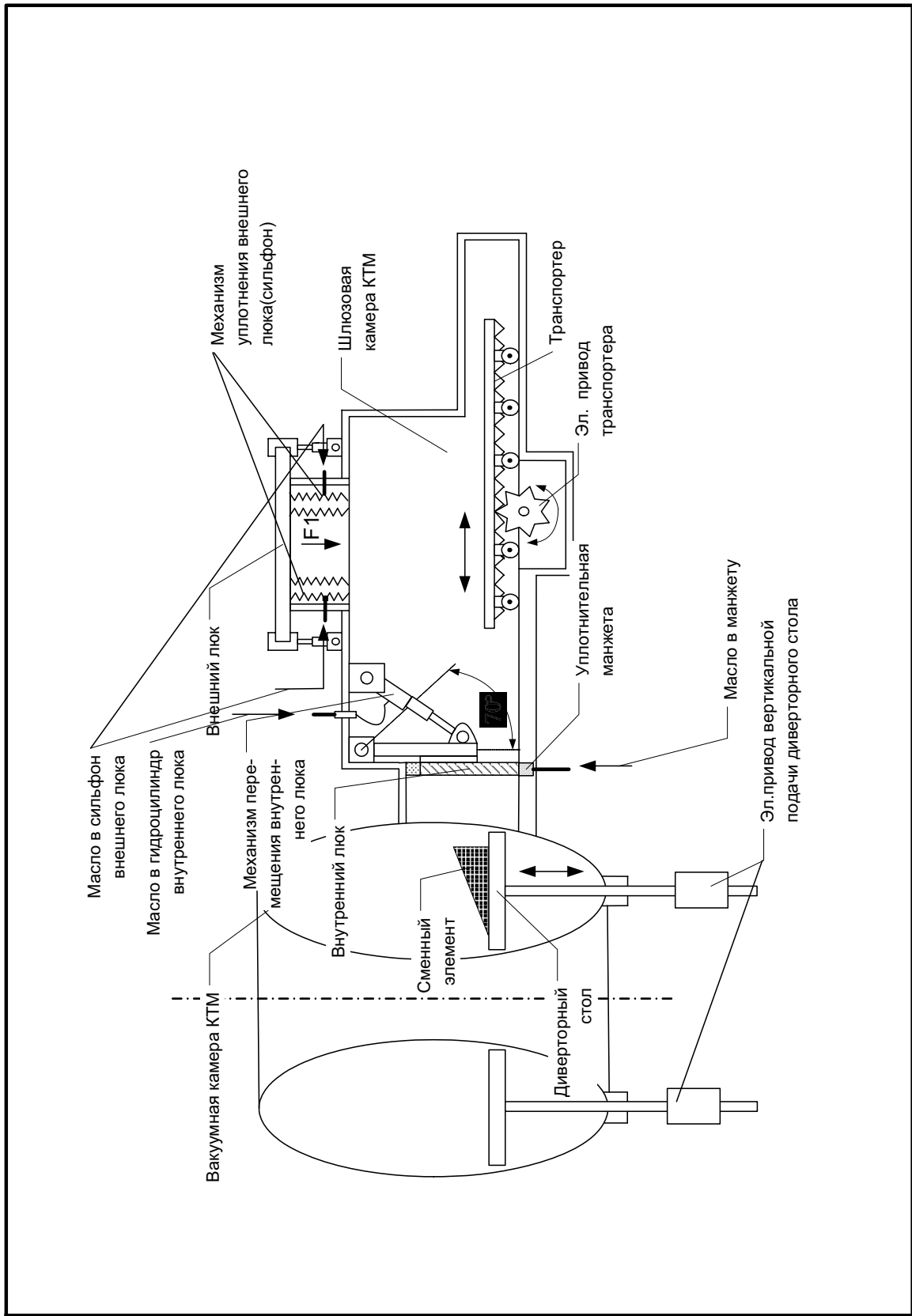


КТМ.03.001.013 Структурно-функциональная схема системы водяного охлаждения КТМ

Лист

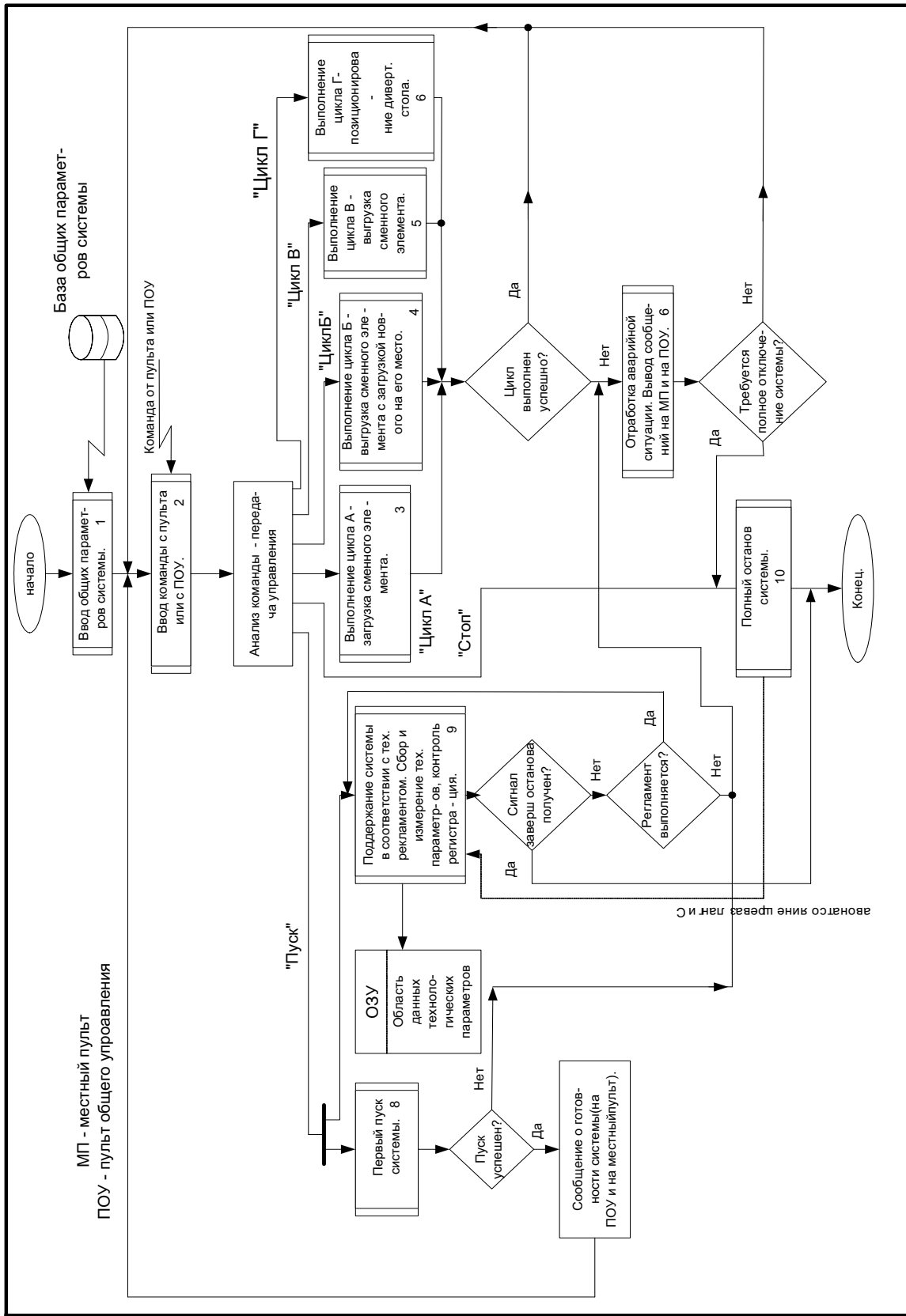
16

Изм. Лист № докум. Подпись Дата

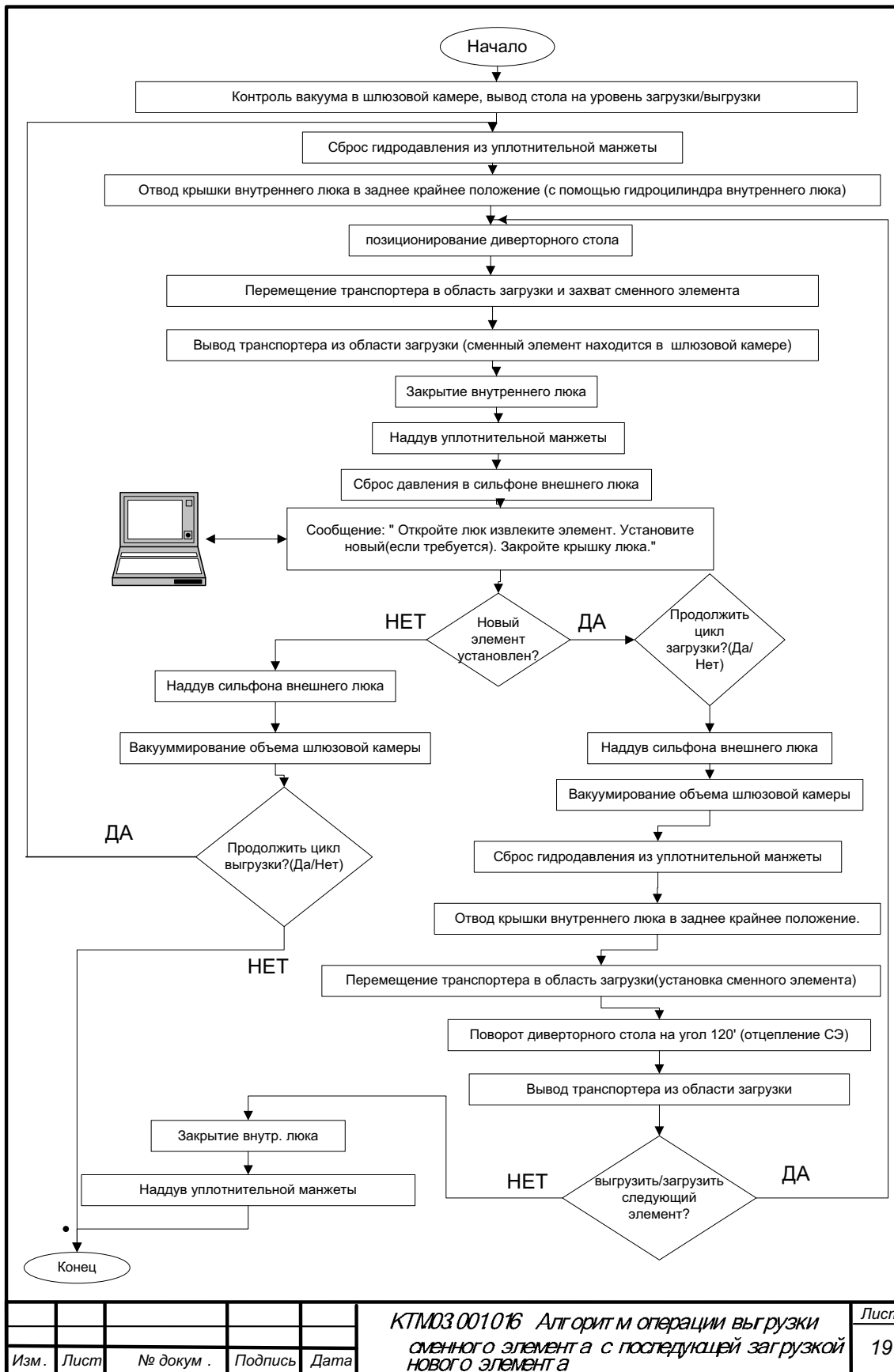


Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	КТМ.03.001.014 Технологическая схема СПДШУ ТОКАМАКА КТМ	Лист
						17





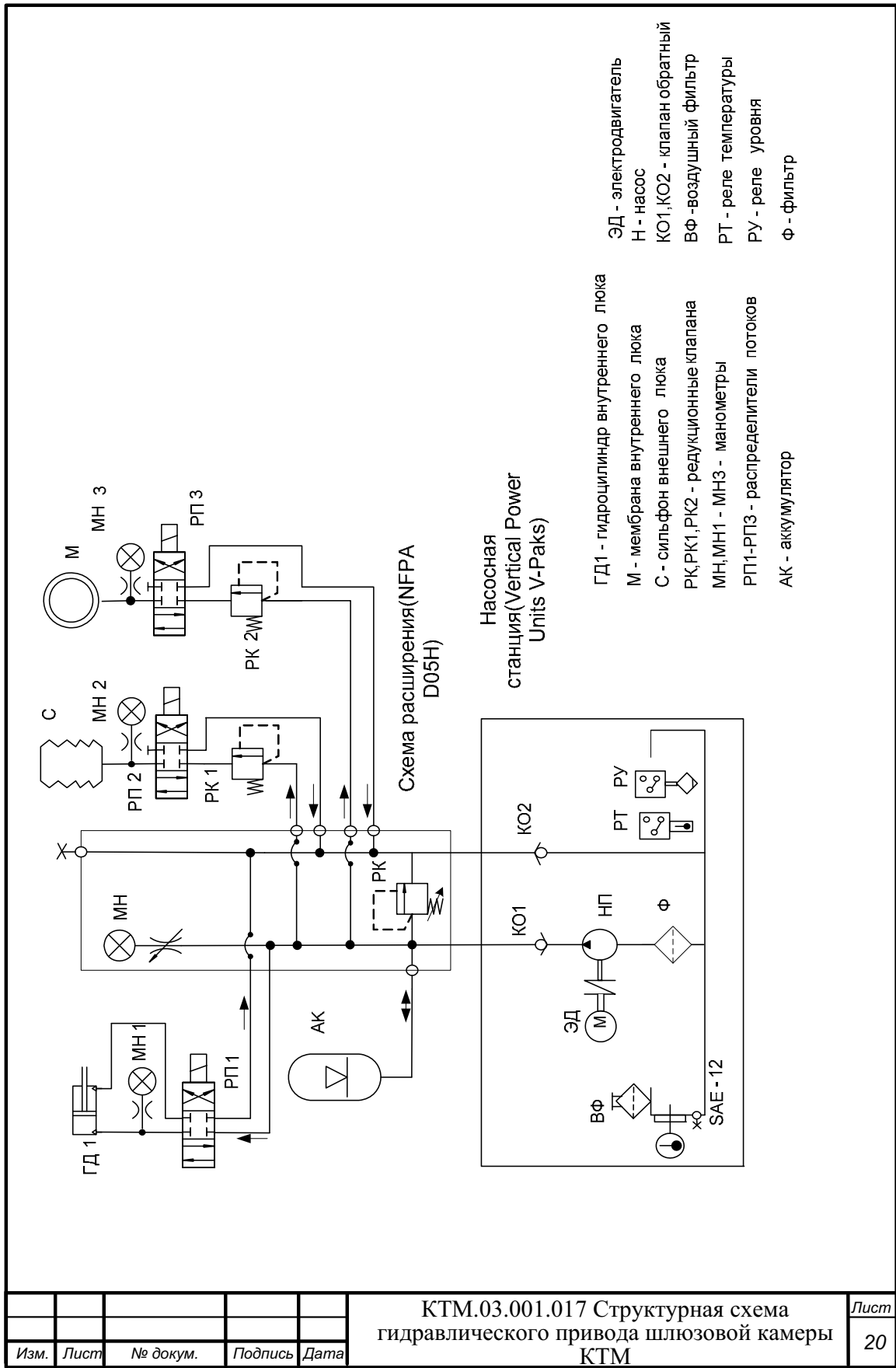
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	КТМ.03.001.015 Схема алгоритма функционирования подсистемы управления СПДШУ ТОКАМАКА КТМ	Лист 18
------	------	----------	---------	------	--	---------



КТМ03.001.016 Алгоритм операции выгрузки сменного элемента с последующей загрузкой нового элемента

Лист 19

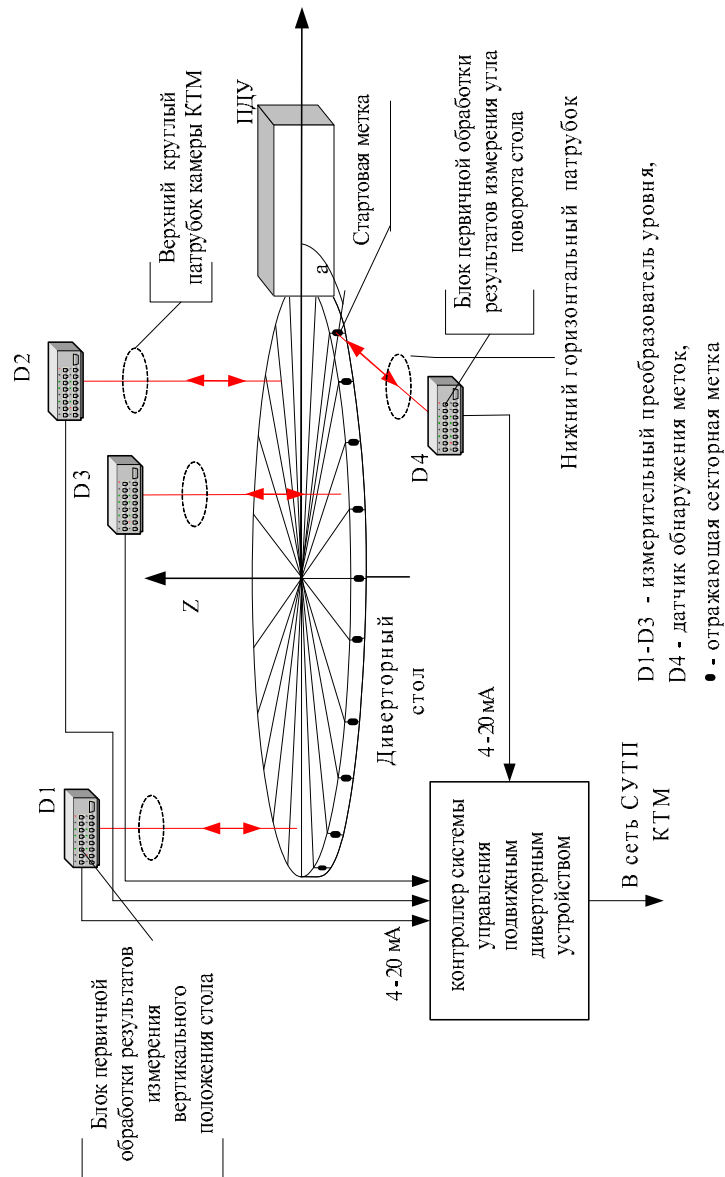
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата



КТМ.03.001.017 Структурная схема гидравлического привода шлюзовой камеры КТМ

Лист 20

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

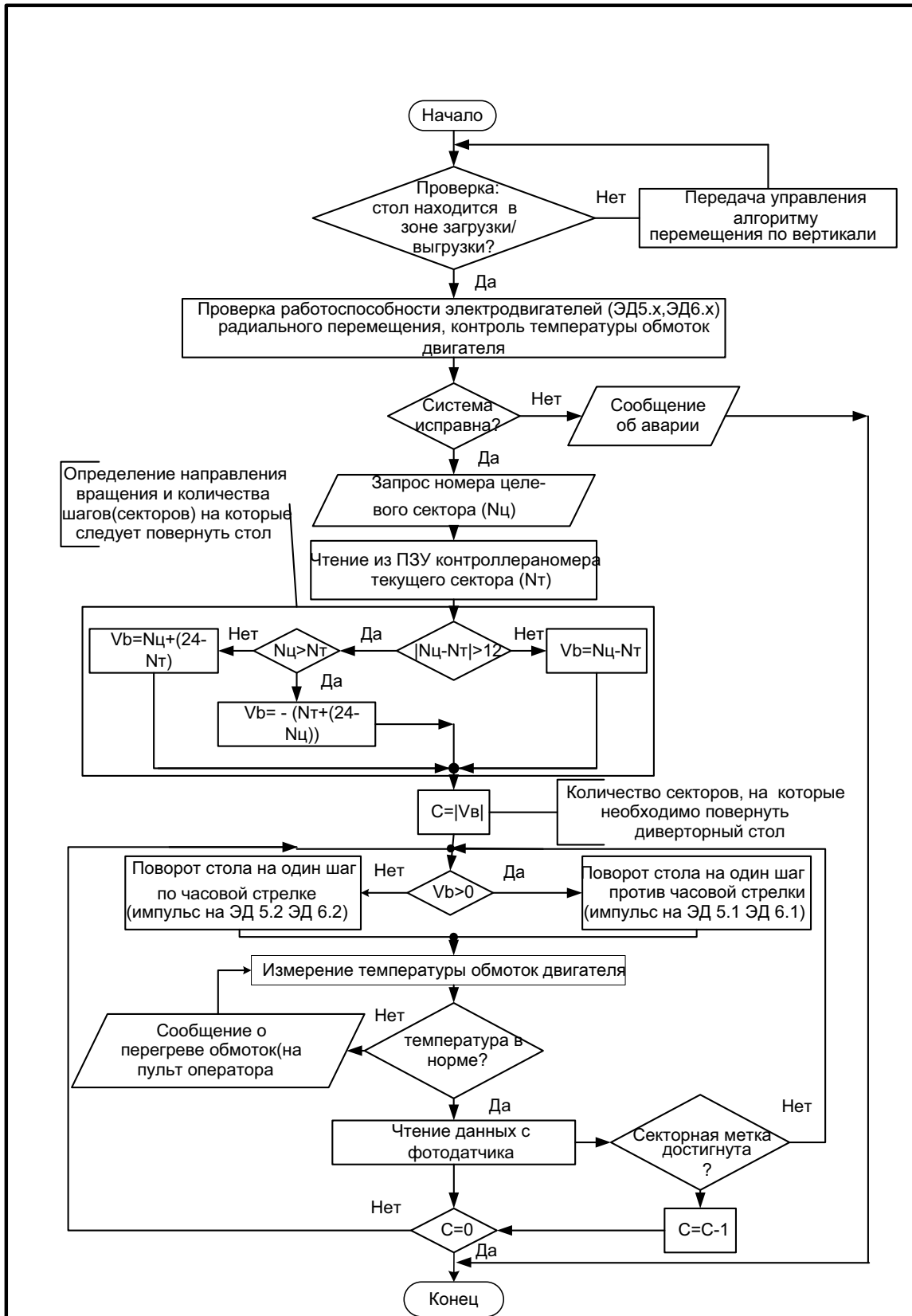


D1-D3 - измерительный преобразователь уровня,

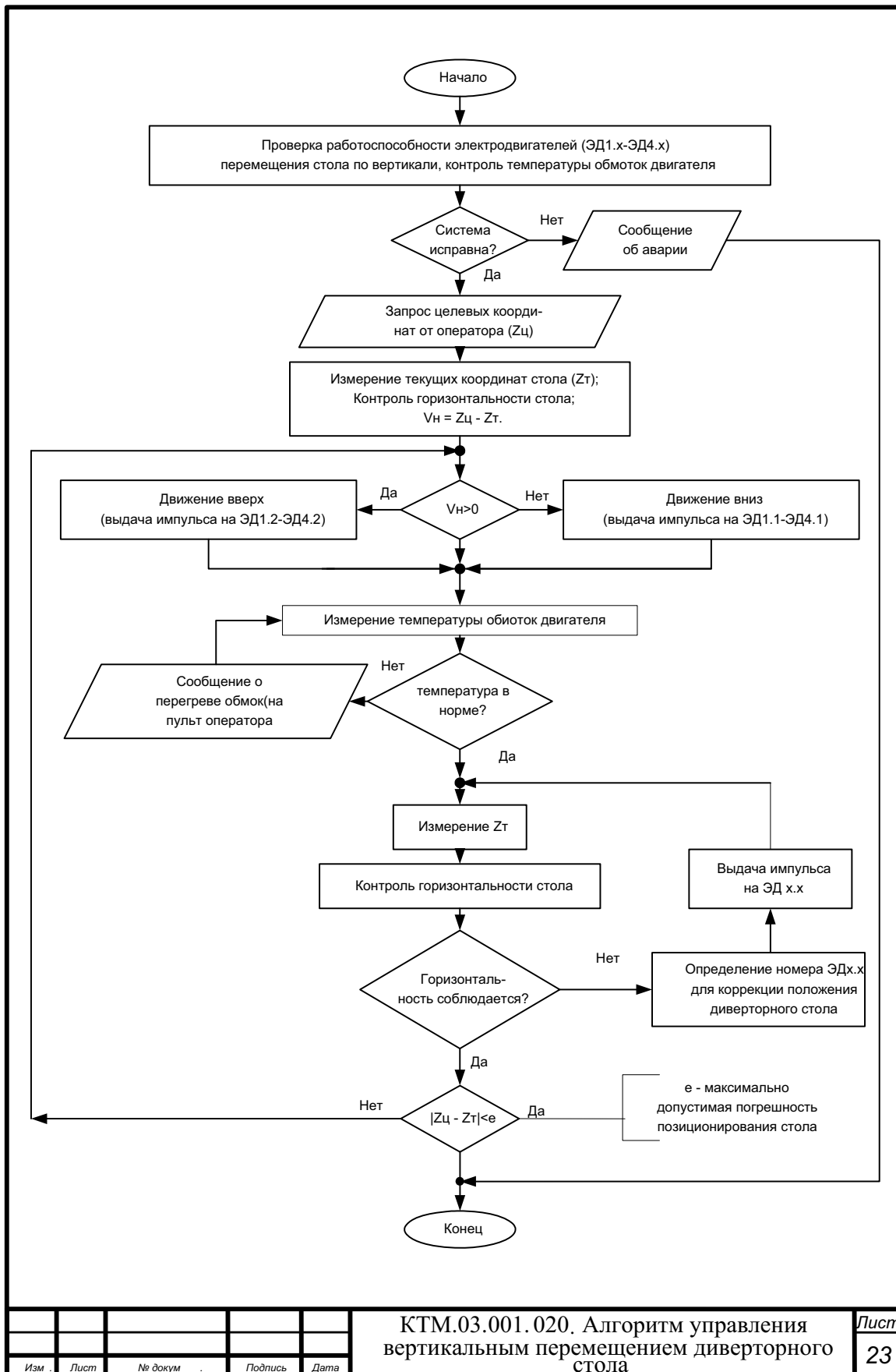
D4 - датчик обнаружения меток,

• - отражающая секторная метка

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	КТМ.03.001.018 Схема контроля вертикального и радиального положения диверторного стола	Лист 21
------	------	----------	---------	------	--	------------



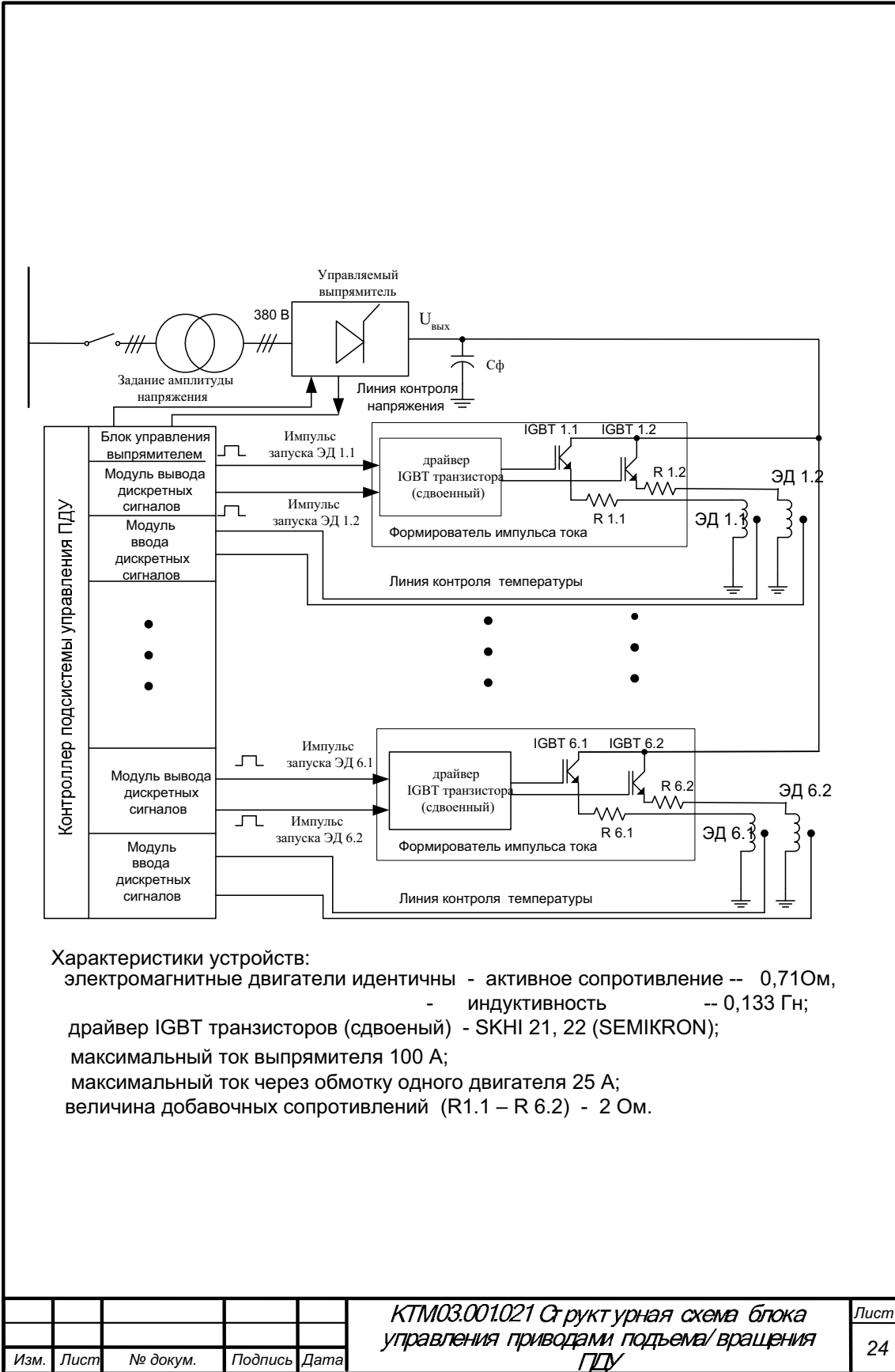
					КТМ.03.001.019 Алгоритм управления вращением диверторного стола	Лист 22
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		



КТМ.03.001.020. Алгоритм управления вертикальным перемещением диверторного стола

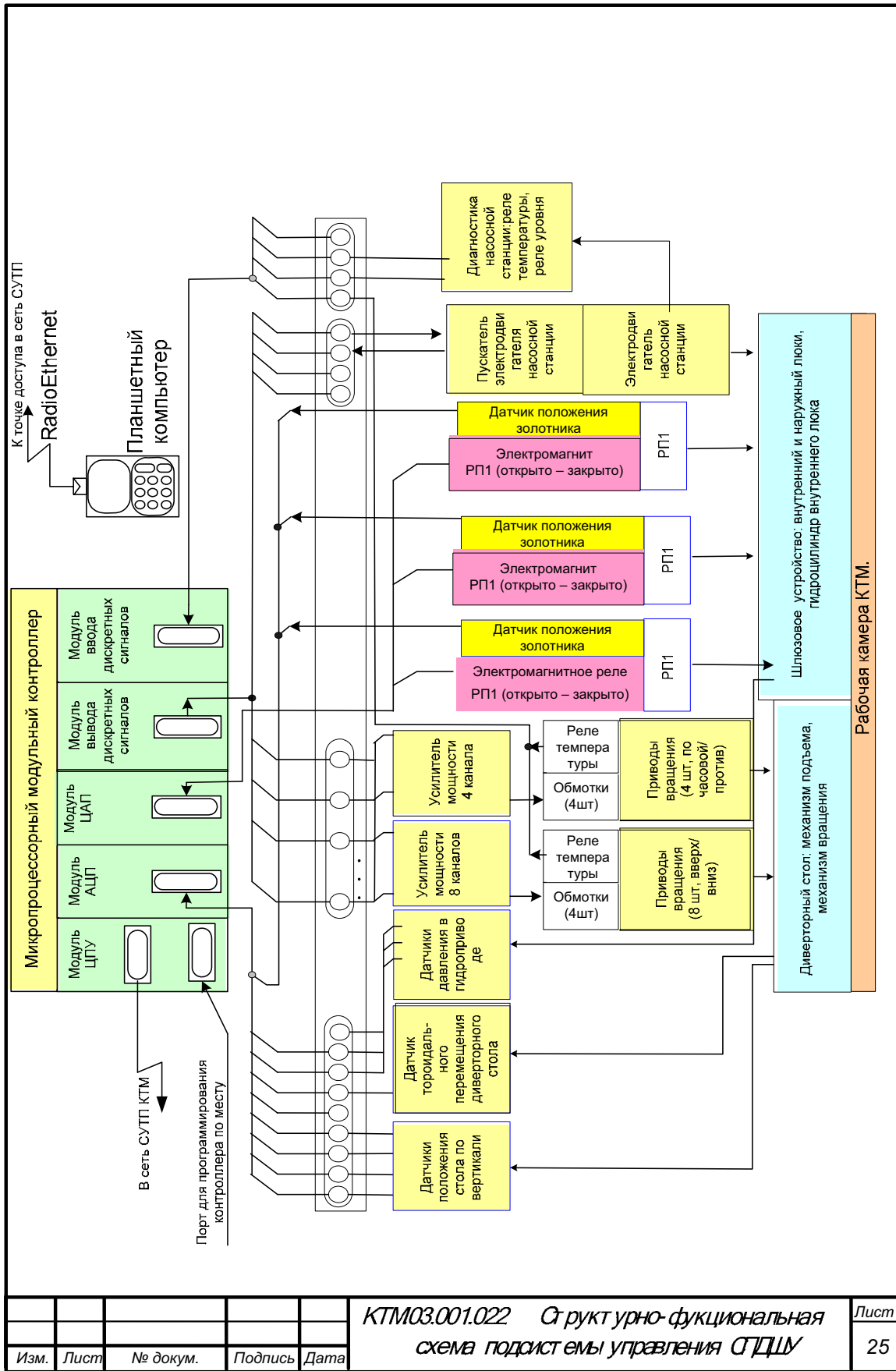
Лист 23

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата



Характеристики устройств:  
 электромагнитные двигатели идентичны - активное сопротивление -- 0,71 Ом,  
 - индуктивность -- 0,133 Гн;  
 драйвер IGBT транзисторов (сдвоенный) - SKH1 21, 22 (SEMIKRON);  
 максимальный ток выпрямителя 100 А;  
 максимальный ток через обмотку одного двигателя 25 А;  
 величина добавочных сопротивлений (R1.1 – R 6.2) - 2 Ом.

					<i>КТМ03.001021 Структурная схема блока          управления приводами подъема/вращения          ПДУ</i>	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		24



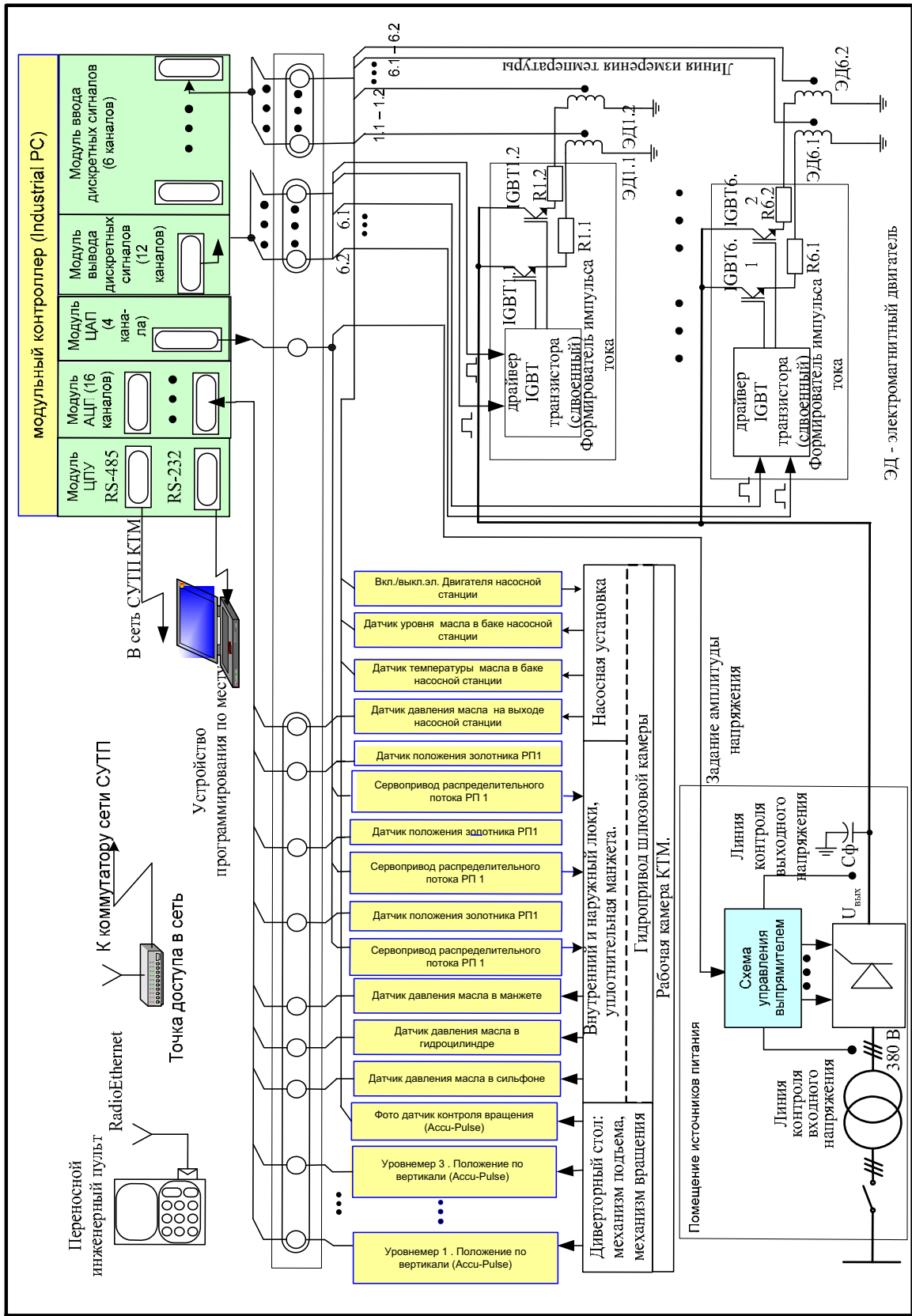
КТМ03.001.022 Структурно-функциональная  
схема подсистемы управления СТДШ

Лист

Изм. Лист № докум. Подпись Дата

25





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

*КТМ03.001023 Структура технических средств в системы управления ГДУ*

Лист  
26

## ЭКРАН УПРАВЛЕНИЯ СИСТЕМОЙ ПДШУ

Текущее положение  
стола по вертикали, мм

Zт = 045

Целевое положение  
стола по вертикали, мм

Zуст = 078

Изменить

Номер сектора  
в области

Nт = 02

Целевой сектор в  
области загрузки

Nуст = 21

Переместить

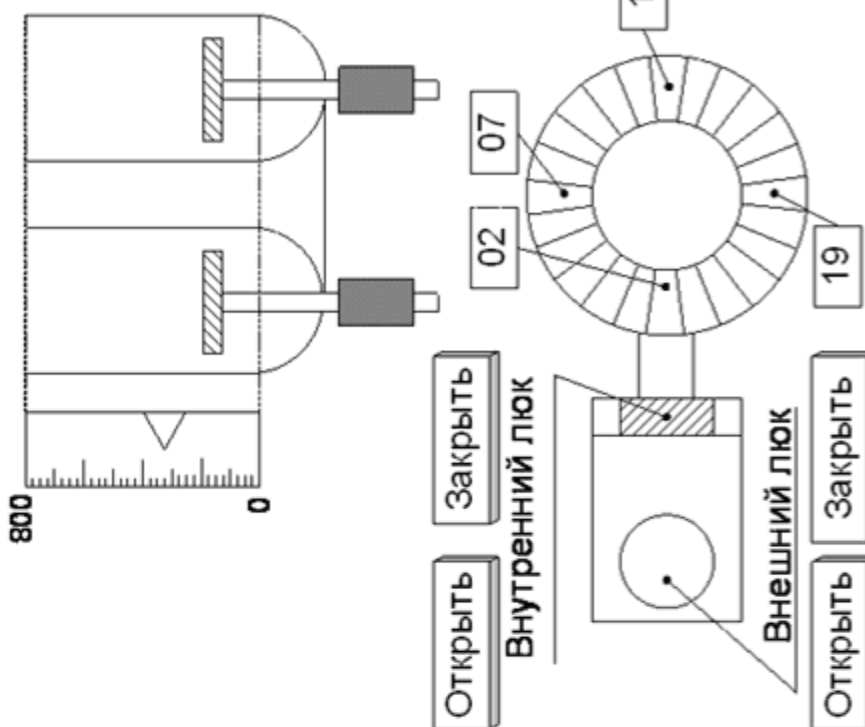
Давление в шлюзовой  
камере

Ратм.(кПа) = 113

Рвак.(Па) = 0.23

На главную  
мнемосхему  
системы

Переход на экран  
параметров  
системы



Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	KTM.03.001.024 Чертеж графического интерфейса подсистемы управления ПДШУ	Лист 27
------	------	----------	---------	------	--	---------

## Экран параметров состояния системы ПДШУ

Температура электромеханических двигателей

1	2	3	4
Норма	Норма	Норма	Норма
Выше нормы	Выше нормы	Выше нормы	Выше нормы
5	6	7	8
Норма	Норма	Норма	Норма
Выше нормы	Выше нормы	Выше нормы	Выше нормы
9	10	11	12
Норма	Норма	Норма	Норма
Выше нормы	Выше нормы	Выше нормы	Выше нормы

Показания уровнемеров, мм

H1	H2	H3
115	114	115

Параметры выпрямителя

Id= 1,9 A; Ud= 1,9 В; Uуст= 1,9

Горизонтальность стола:

В норме | Нарушена

Возврат на экран  
Управления

Уставка

Давление в гидроцилиндре  
внутреннего люка, МПа Rгц = 1,9 1,8

Давление в манжете  
внутреннего люка, МПа Rм = 0,6 0,8

Давление в сильфоне  
внешнего люка, МПа Rс = 0,8 0,8

Давление на выходе  
станции, МПа Rст = 2,2 2,1

Насосная установка | Температура масла

Вкл. |  Выкл. |  Норма |  Выше нормы

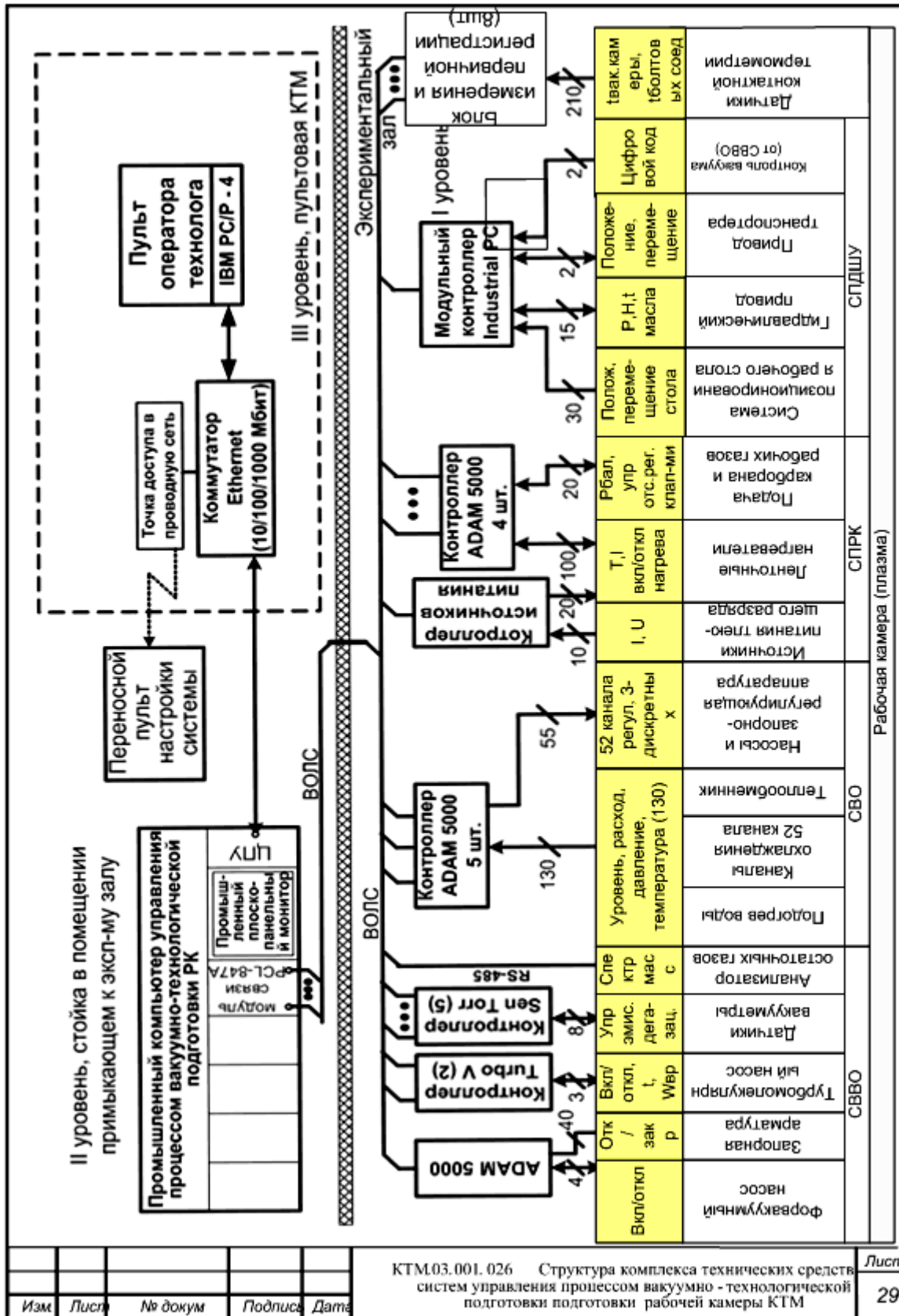
Состояние распределителей потока (РП)

РП1 (гидроцилиндр  
внутреннего люка)  Напор |  Заперт |  Слив

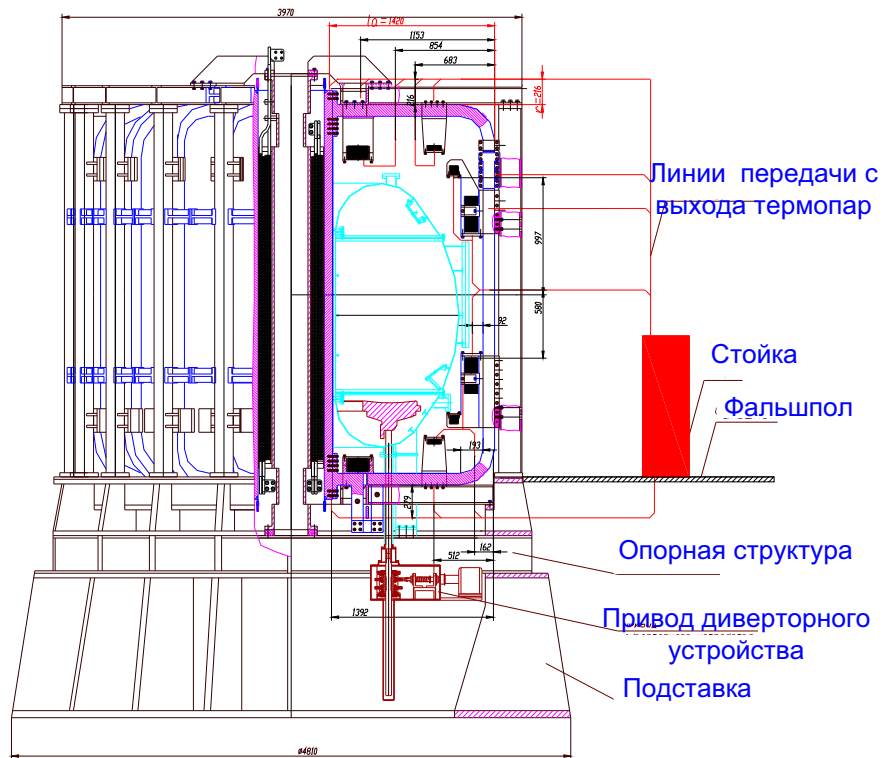
РП2 (Манжета  
внутреннего люка)  Напор |  Заперт |  Слив

РП3 (Сильфон  
внешнего люка)  Напор |  Заперт |  Слив

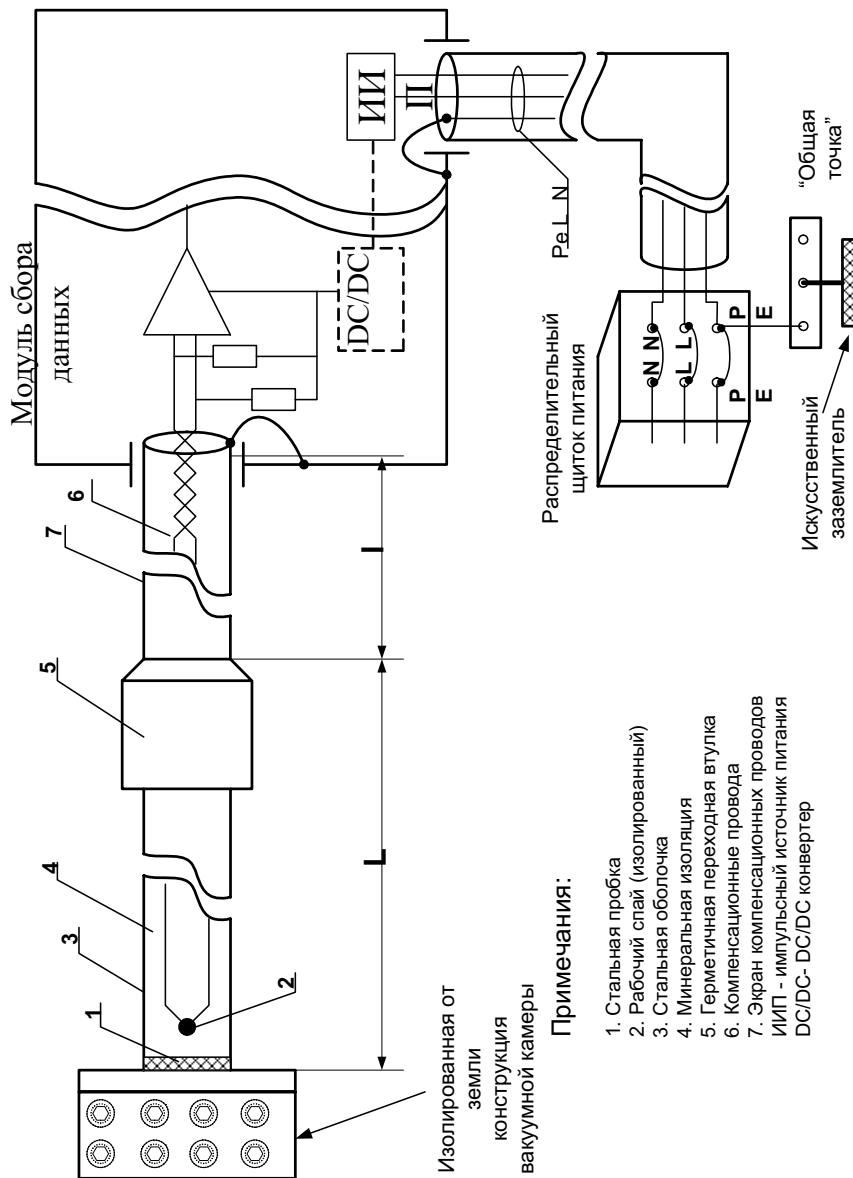
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	КТМ.03.001.025 Чертеж графического интерфейса подсистемы управления ПДШУ	Лист 28
------	------	----------	---------	------	--	------------



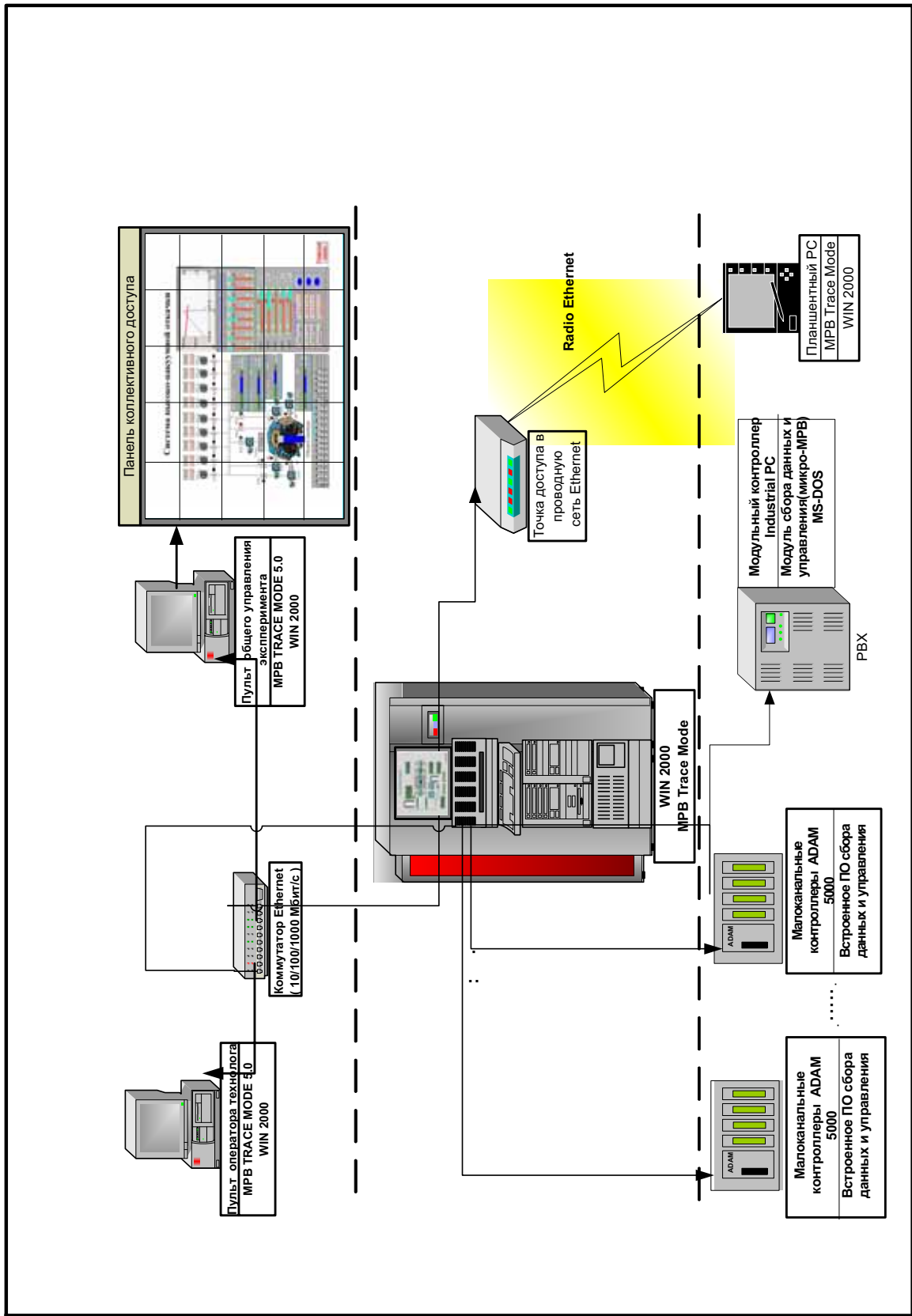
КТМ03.001.026 Структура комплекса технических средств систем управления процессом вакуумно-технологической подготовки рабочей камеры КТМ



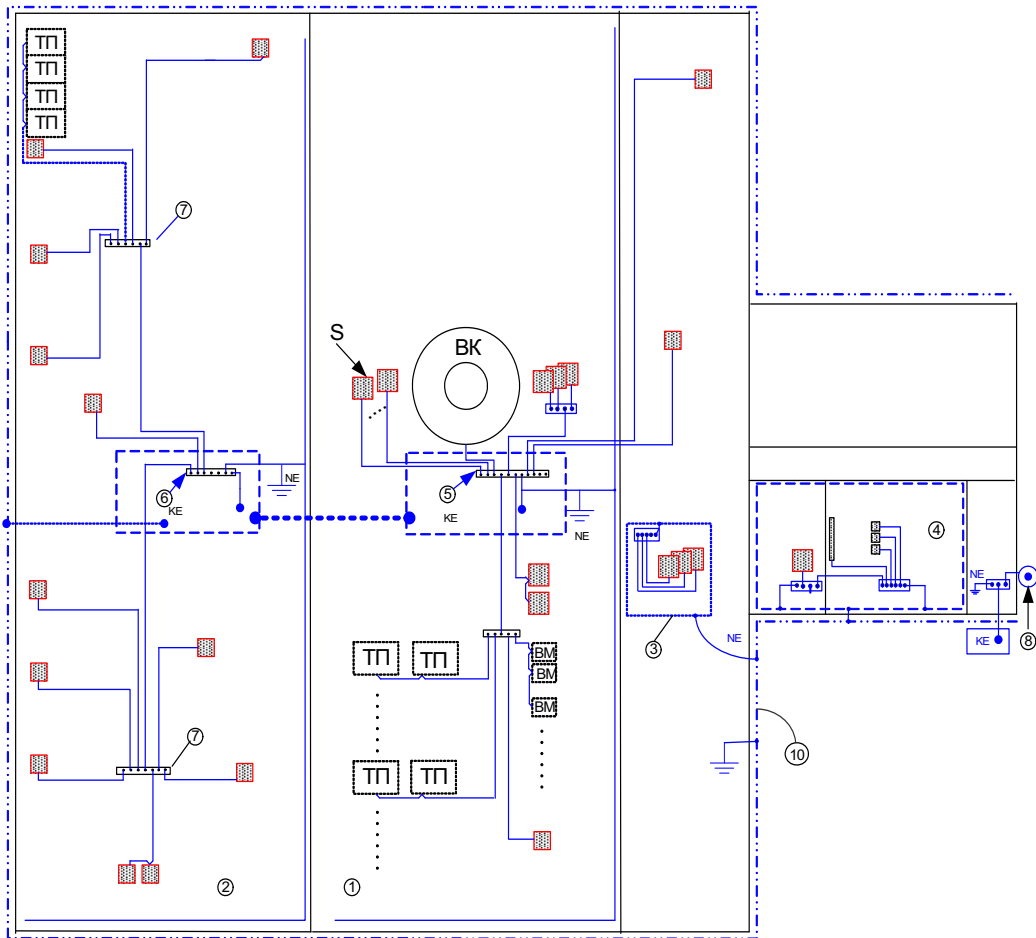
					КТМ.03.001.027 Схема размещения кабельных термопар	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		30



Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	КТМ.03.001.028 Канал измерения температуры болтовых соединений обмоток ЭМС	Лист
						31



Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	<i>КТМ03.001.029. Схема распределения программных модулей в СУТП</i>	Лист 32



Примечания:

1-экспериментальный зал;

2- помещение источников питания;

3- экранированное помещение СУТП;

4- пультовая САЭ;

5-главный щит заземления ;

для экспериментального зала;

6-главный щит заземления ;

для помещения источников питания;

7-вторичные щиты заземления;

8- молниеприемник ;

9- шина выравнивания потенциалов;

10 - контурный заземлитель здания;

S- стойка системы автоматизации;

KE- искусственный заземлитель;

NE- естественный заземлитель;

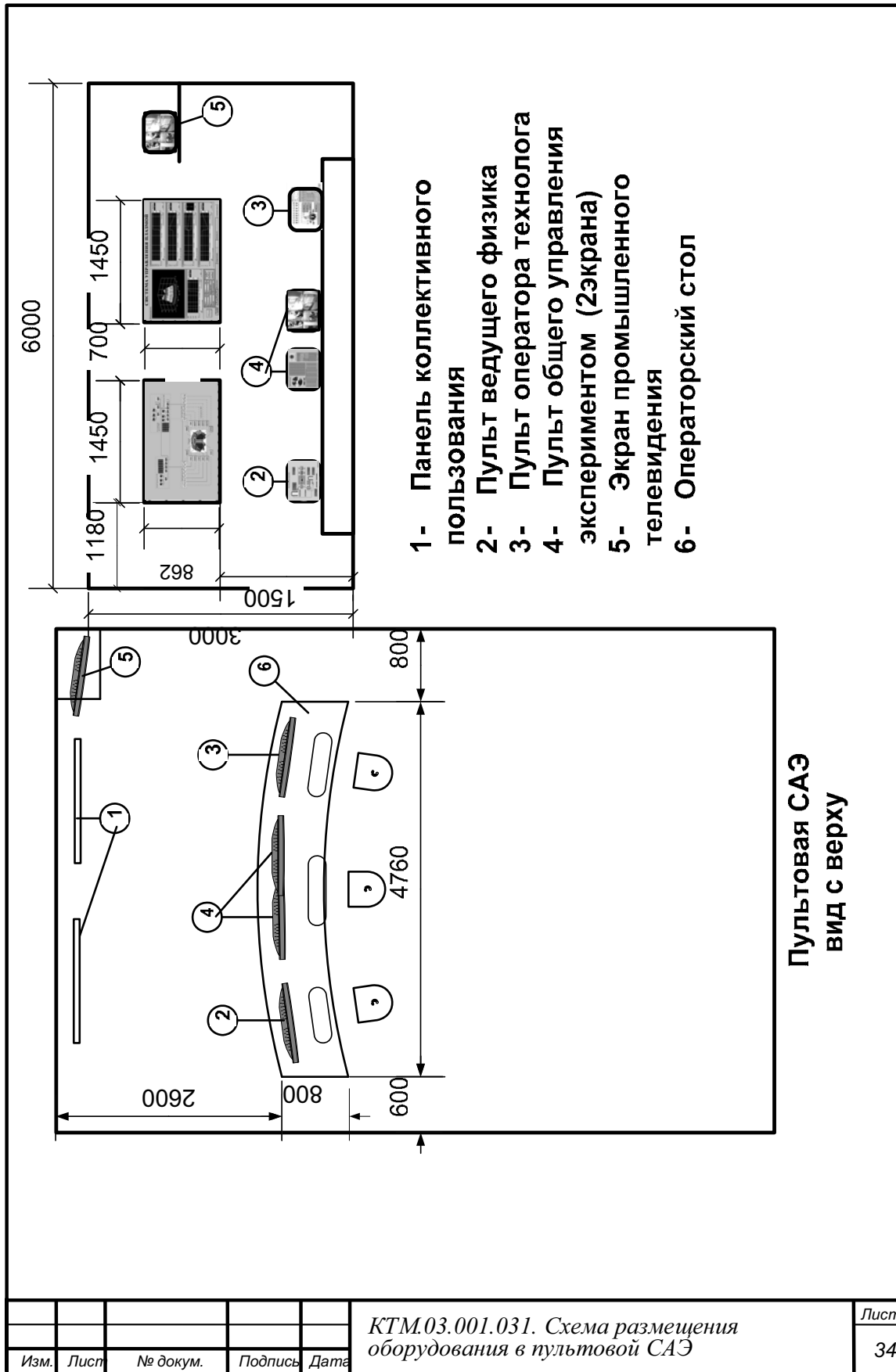
BK- вакуумная камера;

ТП - тиристорный преобразователь;

ВМ - выпрямительный модуль.

					КТМ03.001030 Схема заземления ТСКАМАКА КТМ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		33

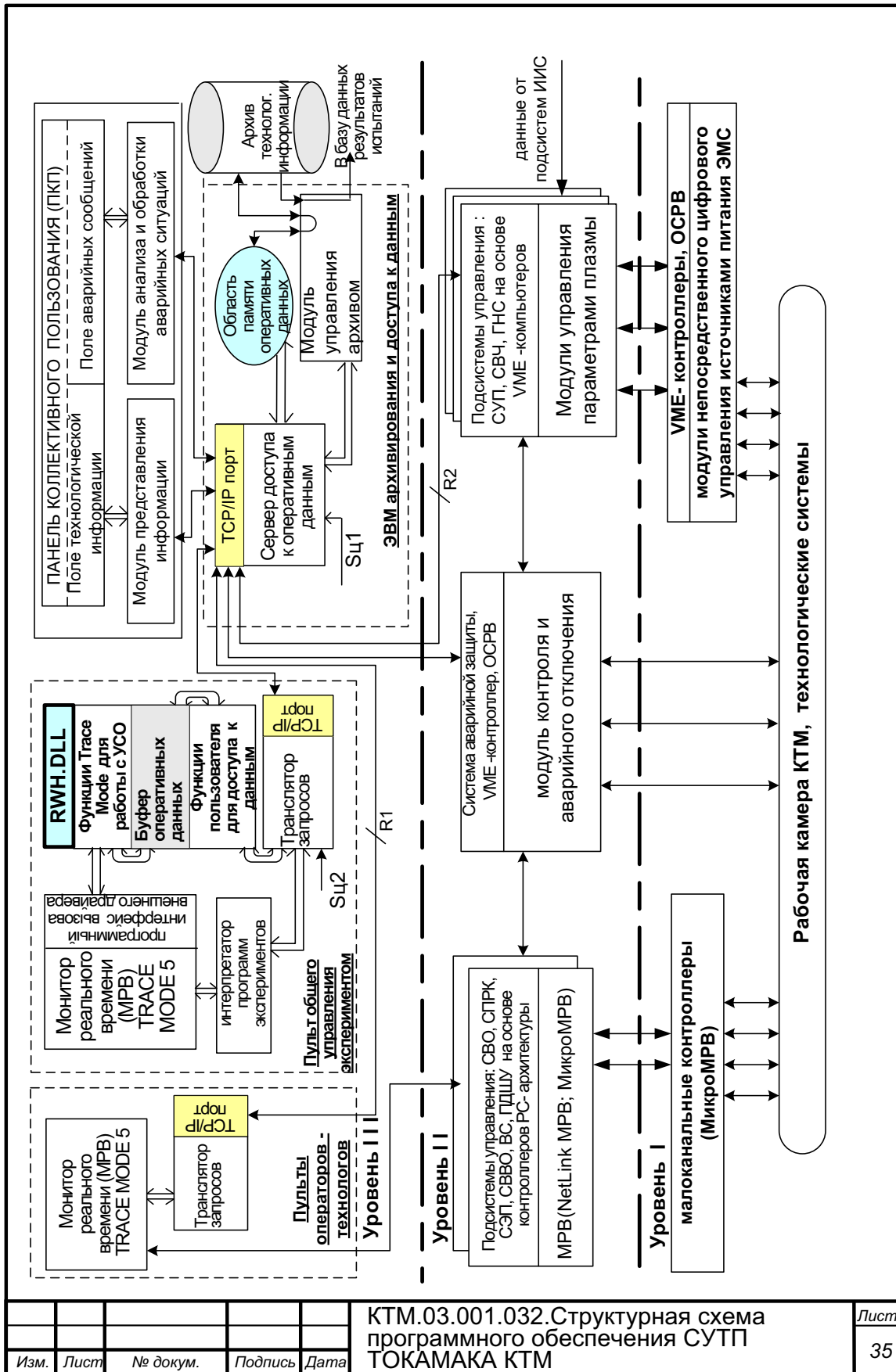




- 1- Панель коллективного пользования
- 2- Пульт ведущего физика
- 3- Пульт оператора технолога
- 4- Пульт общего управления экспериментом (Экрана)
- 5- Экран промышленного телевидения
- 6- Операторский стол

Пультовая САЭ  
вид с верху

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	КТМ.03.001.031. Схема размещения оборудования в пультовой САЭ	Лист
						34



КТМ.03.001.032. Структурная схема программного обеспечения СУТП ТОКАМАКА КТМ

Лист 35

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

Учебное издание

ПАВЛОВ Вадим Михайлович  
МЕЗЕНЦЕВ Антон Алексеевич  
БЕВЗЮК Екатерина Юрьевна  
МАЙСТРУК Галина Александровна

## СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССОМ ПОДГОТОВКИ К ЭКСПЕРИМЕНТУ

Учебное пособие

Научный редактор  
доктор технических наук,  
профессор

*В.И. Бойко*

Редактор  
Компьютерная верстка  
Дизайн обложки

*Н.В. Ифлазоглу*

*В.П. Аршинова*

*О.Ю. Аршинова*

*О.А. Дмитриев*

Подписано к печати 10.12.2008. Формат 60x84/16. Бумага «Снегурочка».

Печать XEROX. Усл. печ. л. 8,9. Уч.-изд. л. 8,05.

Заказ 838. 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.