

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

**Е.И. Громаков, А.Г. Каранкевич**

# **ПРОЕКТИРОВАНИЕ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ ДЛЯ ГИБКИХ АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ ПРОИЗВОДСТВ**

Учебно-методическое пособие

Издательство  
Томского политехнического университета  
2008

УДК 621.396.6  
ББК 844-02я73-5  
Г ЖЖ

**Громаков Е.И.**

Г ЖЖ Проектирование систем управления для гибких автоматизированных производств: учебно-методическое пособие / Е.И. Громаков, А.Г. Каранкевич. – Томск: Изд-во Томского политехнического ун-та, 2008. – 152 с.

Пособие содержит методологию разработки и проектирования интегрированных компьютерных систем управления для гибких автоматизированных производств. На систему управления возлагаются как функции автоматизации процессов проектирования и производства изделий, так и функции, связанные с обеспечением информационной интеграции технологических и производственных процессов. В пособии рассмотрены основные понятия, структура, классификация, методология разработки автоматизированных систем управления с использованием SCADA и MES информационных технологий (интегрированных компьютерных систем управления). Даны рекомендации по разработке архитектуры интегрированной компьютерной системы управления, программного, алгоритмического, информационного и технического обеспечения.

Пособие предназначено для магистрантов дневной формы обучения, обучающихся по направлению 220200 «Автоматизация и управление». Оно может быть использовано студентами других технических специальностей, изучающих вопросы внедрения информационных технологий в управление технологическими и производственными процессами, а также аспирантами и преподавателями вузов.

**УДК 621.396.6**  
**ББК 844-02я73-5**

Рекомендовано к печати Редакционно-издательским советом  
Томского политехнического университета

*Рецензенты*

К.т.н., доцент кафедры АИКС ТПУ.

*Гайворонский С.А.*

Д.т.н., профессор кафедры АСУ ТУСУР

*Калайда В.Т.*

Д.т.н., профессор кафедры ИИТ ТУСУР

*Гарганеев А.Г.*

© Громаков Е.И., Каранкевич А.Г., 2008  
© Томский политехнический университет,  
2008  
© Оформление. Издательство ТПУ, 2008

## СОДЕРЖАНИЕ

ПРЕДИСЛОВИЕ .....	4
ГЛОССАРИЙ .....	5
ЦЕЛЬ И ЗАДАЧИ ПОСОБИЯ .....	9
ВВЕДЕНИЕ .....	11
1. РАЗРАБОТКА КОНЦЕПТУАЛЬНОЙ СТРУКТУРЫ ИНТЕГРИРОВАННОЙ КОМПЬЮТЕРНОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ .....	19
2. РАЗРАБОТКА ТЕХНИЧЕСКОГО ЗАДАНИЯ .....	24
3. ПРОЕКТИРОВАНИЕ АРХИТЕКТУРЫ ИКСУ .....	32
4. ОПИСАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА КАК ОБЪЕКТА АВТОМАТИЗИРОВАННОГО УПРАВЛЕНИЯ .....	43
5. ОПИСАНИЕ ПРОИЗВОДСТВЕННОГО ПРОЦЕССА КАК ОБЪЕКТА АВТОМАТИЗИРОВАННОГО УПРАВЛЕНИЯ .....	49
6. РАЗРАБОТКА ПЕРЕЧНЯ (СПЕЦИФИКАЦИИ) ВХОДНЫХ И ВЫХОДНЫХ СИГНАЛОВ, ДОСТУПНЫХ ДЛЯ ИХ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ В ИКСУ (ТАБЛИЦЫ ВХОД–ВЫХОДНЫХ СИГНАЛОВ) .....	54
7. ВЫБОР ПРОГРАММНЫХ СРЕДСТВ АСУ, ПОДДЕРЖИВАЮЩИХ ПРОФИЛЬ АРХИТЕКТУРЫ ИКСУ .....	58
8. РАЗРАБОТКА СТРУКТУРНОЙ СХЕМЫ ИКСУ .....	63
9. РАЗРАБОТКА ФУНКЦИОНАЛЬНОЙ СХЕМЫ АВТОМАТИЗАЦИИ .....	70
10. ВЫБОР КОНТРОЛЛЕРНЫХ СРЕДСТВ РЕАЛИЗАЦИИ ИКСУ .....	80
11. ВЫБОР ДАТЧИКОВ И ИСПОЛНИТЕЛЬНЫХ МЕХАНИЗМОВ .....	84
12. ВЫБОР (ОБОСНОВАНИЕ) АЛГОРИТМОВ УПРАВЛЕНИЯ АСУ ТП .....	92
13. АЛГОРИТМИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ УПРАВЛЕНИЯ ОБСЛУЖИВАНИЕМ ОБОРУДОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА .....	100
14. РАЗРАБОТКА ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ДЛЯ ПРОГРАММИРУЕМЫХ ЛОГИЧЕСКИХ КОНТРОЛЛЕРОВ ....	109
15. РАЗРАБОТКА ИНФОРМАЦИОННОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ .....	111
17. РАЗРАБОТКА ЭКРАННЫХ ФОРМ ИКСУ .....	119
18. ВЫБОР ИНТЕГРАЦИОННОЙ ПЛАТФОРМЫ САПР И АСУ .....	123
19. ВЫБОР ЭЛЕКТРОПРИВОДНЫХ СРЕДСТВ АСУ .....	126
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК .....	151

## ПРЕДИСЛОВИЕ

Комплексная автоматизация производства является одним из основных направлений технической политики на многих промышленных производствах в нашей стране. Целью комплексной автоматизации управления и проектирования является ускорение темпов повышения производительности труда, улучшение качества продукции и повышение ее конкурентоспособности, сокращение сроков проектирования новых изделий.

Общая идея состоит в том, чтобы разработать, сформировать и внедрить современные механизмы информационных технологий, способные комплексно управлять совместной работой технологических, проектных и бизнес-процессов. В результате интеграции систем управления возможно появление синергетического эффекта, который, в конечном счете, позволит выявить «чистый» экономический эффект от внедрения дорогостоящих программно-технических систем, и тем самым, наконец-то, решится известная проблема оценки эффективности автоматизированных систем.

Внедрение комплексных автоматизированных систем зависит от степени подготовленности специалистов. Это предъявляет особые требования к подготовке специалистов в высших технических учебных заведениях.

В предлагаемом методическом пособии рассматриваются вопросы, связанные с решением задач проектирования интегрированных компьютерных систем от уровня управления производством и его технологией (уровни MES, SCADA) до уровня микроконтроллеров, исполнительных систем, измерительных приборов и устройств ввода производственной информации.

Учебное пособие по проектированию интегрированных систем управления для гибких автоматизированных производств разработано впервые. Из-за отсутствия аналогичных изданий авторам пришлось «лопатить» большой объем информации через Интернет, переводить и изучать множество зарубежных публикаций и рекламных материалов.

Книга будет полезна самому широкому кругу читателей, включая студентов соответствующих специальностей, профессионалов в области проектирования и эксплуатации автоматизированных систем управления.

Пособие состоит из 19 разделов. Введение и разделы 1–18 подготовлены доцентом Е.И. Громаковым, раздел 19 подготовлен доцентом А.Г. Каранкевичем.

Авторы глубоко признательны декану АВТФ ТПУ Сергею Анатольевичу Гайворонскому за рецензирование этой работы и сделанные им замечания.

Авторы благодарны научному редактору профессору Александру Максимовичу Малышенко за ободряющую поддержку, внимательное прочтение рукописи, бережное отношение к ее содержанию при редакции.

*Авторы*

## ГЛОССАРИЙ

<b>Термин</b>	<b>Определение</b>
<b>АРМ</b>	Автоматизированное рабочее место – программно-технический комплекс АС, предназначенный для автоматизации деятельности определенного вида.
<b>АС</b>	Автоматизированная система.
<b>БД</b>	База данных – организованная в соответствии с определенными правилами и поддерживаемая в памяти компьютера совокупность данных, характеризующая актуальное состояние предметной области и используемая для удовлетворения информационных потребностей пользователей.
<b>БП</b>	Бизнес-процесс – модель преобразования сущностей типа «вход-выход», понимаемая как работа по реализации приписываемой функции.
<b>ГАП</b>	Гибкое автоматизированное производство. Представляет собой гибкую производственную систему, состоящую из одного или нескольких гибких производственных комплексов, объединенных автоматизированной системой управления.
<b>Интеграция</b>	Интеграция (в системе или систем) – повышение качественного уровня взаимосвязей между элементами системы, а также процесс создания из нескольких разнородных систем единой системы, с целью исключения (до технически необходимого минимума) функциональной и структурной избыточности и повышения общей эффективности функционирования.
<b>ИКСУ</b>	Интегрированная компьютерная система управления – совокупность двух или более взаимоувязанных АС, в которой функционирование одной из них зависит от результатов функционирования другой (других) так, что эту совокупность можно рассматривать как единую АС.
<b>Интерфейс</b>	Совокупность средств (программных, технических, информационных, лингвистических) и правил для обеспечения взаимодействия между различными программными системами, между техническими устройствами или между пользователем и системой.

<b>Информационное обеспечение</b>	Совокупность форм документов, классификаторов, нормативной базы и реализованных решений по объемам, размещению и формам существования информации, применяемой в автоматизированной системе при ее функционировании.
<b>Производственное оборудование</b>	Станки, агрегаты, на которых выполняются производственные операции по обработке изделий и полуфабрикатов.
<b>Архитектура</b>	Набор значимых решений по поводу организации системы программного обеспечения, набор структурных элементов и их интерфейсов, при помощи которых компоуется система, вместе с их поведением, определяемым во взаимодействии между этими элементами; компоновка элементов в постепенно укрупняющиеся подсистемы, а также стиль архитектуры, который направляет эту организацию, элементы и их интерфейсы, взаимодействия и компоновку.
<b>Профиль ИКСУ</b>	Подмножество и/или комбинации базовых стандартов информационных технологий, необходимые для реализации требуемых наборов функций (ГОСТ Р ИСО/МЭК ТО 10000-1-99).
<b>АСУ ТП</b>	Автоматизированная система управления технологическим процессом – человеко-машинный комплекс, обеспечивающий управление технологическими процессами на современных механизированных и автоматизированных промышленных предприятиях.
<b>АСУ ПП</b>	Автоматизированные системы управления производственными процессами.
<b>Техническое задание на АС (ТЗ)</b>	Утвержденный в установленном порядке документ, определяющий цели, требования и основные исходные данные, необходимые для разработки автоматизированной системы, и содержащий предварительную оценку экономической эффективности.
<b>Технологический процесс</b>	Последовательность технологических операций, необходимых для выполнения определенного вида работ.
<b>Логистика</b>	Управление закупкой, снабжением, перевозками и хранением материалов, деталей и готового инвентаря (техники и проч.), а также управление соответствующими потоками информации.
<b>СУБД</b>	Система управления базами данных – совокупность программных и языковых средств, предназначенных для управления данными в базе данных, ведения базы

	данных, обеспечения многопользовательского доступа к данным.
<b>КИС</b>	Корпоративная информационная система, предназначенная для автоматизации учёта и управления (см. ERP и MRP).
<b>Сущность</b>	Реальный или представляемый объект, информация о котором должна сохраняться и быть доступна.
<b>Атрибут</b>	Атрибутом сущности является любой признак/параметр, который служит для уточнения, идентификации, классификации, числовой характеристики или выражения состояния сущности.
<b>Данные</b>	Данные (в предметной области) – представление информации в формализованном виде, удобном для пересылки, сбора, хранения и обработки.
<b>DCS (англ. Distributed Control Systems)</b>	Системы управления распределенной производственной средой в масштабах установки или цеха. Стандартная DCS состоит из отдельных узлов (на основе PLC), объединенных в сеть по интерфейсам.
<b>SCADA (англ. Supervisory Control And Data Acquisition)</b>	Диспетчерское управление и сбор данных. Под термином SCADA понимают инструментальную программу для разработки программного обеспечения систем управления технологическими процессами в реальном времени и сбора данных.
<b>PDM (англ. Product Data Management)</b>	Система управления данными об изделии, обеспечивающая управление всей информацией об изделии. При этом в качестве изделий могут рассматриваться различные сложные технические объекты (корабли и автомобили, самолёты и ракеты, компьютерные сети и др.).
<b>Batch Control</b>	Последовательное управление. Концепции и понятия последовательного управления определены в стандарте S88.01, Models and Terminology комитета ISA (1995 г.). Позволяет оптимизировать производственный цикл (необязательно замкнутый) в последовательно-непрерывных отраслях на основе математических моделей и алгоритмов.
<b>PLC (англ. Programmable Logic Controllers)</b>	Программируемый логический контроллер.
<b>ERP (Enterprise Resource Planning)</b>	Планирование ресурсов предприятия. Основные задачи системы: эффективное управление сбытом и снабжением; контроль за финансовыми и материальными потоками; планирование выпуска продукции.

<b>MRP</b> (англ. <b>Material Requirement Planning</b> )	Планирование потребностей в материалах. Основные задачи системы: планирование продаж и операций, объемно-календарное планирование, планирование потребности в материалах, планирование потребности в производственных мощностях.
<b>MES</b> (англ. <b>Manufacturing Execution Systems</b> )	Исполнительные системы производства. Основные задачи системы: управление производственными и людскими ресурсами в рамках технологического процесса, управление качеством продукции, хранение исходных материалов и произведенной продукции по технологическим подразделениям, связь систем ERP и SCADA/DCS.
<b>CALS,</b> (англ. <b>Continuous Acquisition and Life cycle Support</b> )	Непрерывная информационная поддержка поставки и жизненного цикла продукции.
<b>PLM</b> (англ. <b>Product Lifecycle Management</b> )	Технология управления жизненным циклом изделия, обеспечивающая управление всей информацией об изделии и связанных с ним процессах на протяжении всего его жизненного цикла, начиная с проектирования и производства до снятия с эксплуатации.
<b>CASE</b> (англ. <b>Computer Aided Systems Engineering</b> )	Автоматизированное проектирование систем с использованием специальных пакетов инструментальных средств, т. н. CASE-технологии.
<b>Ethernet</b>	Стандарты построения локальных вычислительных сетей (ЛВС), описывающие спецификации сетевого кабеля, способов связи и методов доступа к разделяемой среде передачи.
<b>SQL</b> (англ. <b>Structured Query Language</b> )	Структурированный язык запросов. Стандартное средство доступа к серверу баз данных.
<b>CIM</b> (англ. <b>Computer Integrated Manufacturing</b> )	Компьютеризированное интегрированное производство. Это интегрированный набор возможностей автоматизированного проектирования (САПР-системы), оперативного управления цехами (АСУ ПП/ АСУП) и оборудованием, технологическим процессом (АСУ ТП-системы).
<b>САПР К</b> (англ. <b>CAD Computer-Aided Design</b> )	Системы автоматизированного проектирования конструкторских и технологических работ соответственно.
<b>САПР Т</b> (англ. <b>CAM, Computer-aided manufacturing</b> )	



## ЦЕЛЬ И ЗАДАЧИ ПОСОБИЯ

Учебным планом подготовки магистров по направлению 220200 «Автоматизация и управление» предусмотрено выполнение проектных работ по дисциплине «Разработка интегрированной компьютерной системы управления для гибкого автоматизированного производства», а также НИР «Компьютерное управление и SCADA-системы в гибких автоматизированных производствах». Рабочие программы этих дисциплин устанавливают следующие образовательные цели:

**умение** выполнять проектные и научно-исследовательские работы в области интегрированных компьютерных систем управления, выбирать и использовать технические и программные средства, математический аппарат при проектировании интегрированных систем управления (SCADA, MES, САПР);

**знание** коммерческих SCADA, MES систем, интегрированных систем автоматизации проектных работ и управления технологическими процессами и производством, технологий программирования контроллерных средств, коммуникационных информационных технологий и т. п.;

**получение практических навыков** при разработке конструкторско-технологической документации интегрированных компьютерных систем управления.

В проектных и консалтинговых организациях проектирование систем автоматизации технологических и производственных процессов обычно выполняется в соответствии с требованиями Единой системы конструкторской документации (ЕСКД). Согласно ГОСТ 34.601–90 предусматривается пять стадий разработки конструкторской документации автоматизированных систем (АС):

- 1) формирование требований к АС;
- 2) разработка концепции АС;
- 3) техническое задание;
- 4) эскизный проект;
- 5) рабочая документация.

**Техническое задание** [3] устанавливает основное назначение, показатели качества разрабатываемого изделия, его технические и тактико-технические характеристики, технико-экономические требования, предъявляемые к нему, необходимые стадии разработки конструкторской документации, ее состав, а также специальные требования к изделию.

**Эскизный проект** – это совокупность конструкторских документов, которые должны содержать принципиальные конструктивные ре-

шения, дающие общее представление об устройстве и принципе работы изделия, а также данные, определяющие назначение, основные параметры и габаритные размеры разрабатываемого изделия.

**Рабочая документация** – это совокупность конструкторских документов, которые должны содержать окончательные технические решения, дающие полное представления об устройстве разрабатываемого изделия, и исходные данные для разработки рабочей документации.

Рабочие чертежи выполняются в соответствии с ЕСКД, действующими стандартами на условные обозначения, руководящими и нормативными документами по проектированию и монтажу систем автоматизации, электрического и противопожарного проектирования. Рабочий проект включает в себя:

- структурные и функциональные схемы автоматических систем;
- принципиальные электрические, гидравлические, пневматические схемы управления, регулирования, блокировки, сигнализации, а также электрические схемы питания;
- общие виды и монтажные схемы щитов и пунктов;
- схемы внешних электрических и трубных проводок, а также их монтажные чертежи;
- чертежи установки аппаратуры, щитов и пультов;
- пояснительную записку и другие технические документы, установленные в техническом задании.

При выполнении курсового проектирования предусматривается разработка основных элементов технической документации на четырех первых проектных стадиях.

## ВВЕДЕНИЕ

Важным этапом развития информационных технологий в машиностроении стало появление гибких производственных систем (ГПС).

В соответствии с ГОСТ 26228–90, гибкая производственная система (ГПС) это «...управляемая средствами вычислительной техники совокупность технологического оборудования, состоящего из разных сочетаний гибких производственных модулей и (или) гибких производственных ячеек, автоматизированной системы технологической подготовки производства и системы обеспечения функционирования, обладающая свойством автоматизированной переналадки при изменении программы производства изделий».

Принципиальной особенностью ГПС является наличие компьютерной системы управления, обеспечивающей возможность увязки отдельных процессов, функций и задач в единую систему.

Исследованиям в области применения информационных технологий в ГПС посвящено значительное число публикаций [1].

Развитие ГПС в направлении расширения применения компьютерных систем для управления привело к появлению понятия компьютеризированного интегрированного производства (СІМ). Концепция СІМ подразумевает новый подход к организации и управлению производством, новизна которого заключается не только в применении компьютерных технологий для автоматизации технологических процессов и операций, но в создании интегрированной информационной среды предприятия. На этой стадии развития промышленных информационных технологий возник и был апробирован целый ряд фундаментальных идей, принципов и технологий.

- Сформировался 3D-класс систем автоматизации инженерного труда в процессах разработки изделия и подготовки производства. Появление трехмерного моделирования позволило качественно изменить процесс проектирования: теперь разработчик сразу начинает видеть свою конструкцию такой, какой она и будет в действительности. По 3D-модели создаются чертежи. Причем, делать это стало существенно проще, чем вручную, поскольку вся геометрия на чертеже формируется автоматически, позволяя конструктору не задумываться о правильности построения видов, разрезов и сечений. 3D-модель можно также использовать для решения расчетных задач (анализ напряжений, перемещений, колебаний, гидродинамики, теплопередачи), подготовки управляющих программ для станков с

ЧПУ, а также реалистичных изображений для технической документации и рекламных материалов, создания физических образцов на установках быстрого прототипирования, в частности, с помощью 3D-принтера.

- На основе конструкторских геометрических моделей изделия (CAD) при помощи автоматизированных систем технологической подготовки производства (CAM) начали разрабатываться программы для станков с ЧПУ. Обмен геометрическими данными в электронном виде между CAD и CAM системами явился одним из первых реальных примеров информационной интеграции процессов [8].
- Были стандартизированы форматы данных, объединенных воедино системой управления техническим документооборотом (PDM) [8, 9].
- Создалась основа для формирования функциональных стандартов (в частности, MES/S-95), регламентирующих общепринятые управленческие технологии в производстве, реализуемые с использованием компьютерных систем управления ГПС.

В CIM впервые не только решаются задачи автоматизации отдельных производственных процессов, но и реализуются принципы информационной интеграции.

Информационная интеграция процессов достигается путем использования общих баз данных, позволяющих более эффективно решать вопросы разработки и проектирования изделий, подготовки производства, планирования и управления производством, решения задач материально-технического обеспечения, охватывая все процессы предприятия.

В концепции CIM особую роль играет интегрированная компьютерная система управления (ИКСУ). На ИКСУ возлагаются как функции автоматизации процессов проектирования и производства изделий, так и функции, связанные с обеспечением информационной интеграции технологических и производственных процессов. Эта интеграция осуществляется за счет аппаратно-программных средств, проектированию которых и посвящено это учебно-методическое пособие.

В составе ИКСУ обычно выделяют автоматизированную систему управления (АСУ) производственным процессом (АСУ ПП), АСУ конструкторско-технологической подготовки производства (АСКТПП), АСУ технологическим процессом (АСУ гибкими производственными участками).

Практика показала, что из всех задач ИКСУ наиболее важными при ее разработке являются:

- для АСКТПП ГАП – задачи автоматизации проектирования и подготовки производства (CAD/CAM);

- для АСУ ПП ГАП – задачи уровня управления производственным процессом в соответствии с рекомендациями стандартов MES/S95;
- для АСУ ТП ГАП – задачи уровня управления технологическим процессом АСУ ТП (DSC, SCADA).

Анализ развития информационных технологий в производственных задачах показывает, что основной тенденцией является все более полный охват стадий жизненного цикла продукции.

По определению, приведенному в стандартах ISO 9000: 2000, жизненный цикл (ЖЦ) продукции – это совокупность процессов, выполняемых от момента выявления потребностей общества в определенной продукции до момента удовлетворения этих потребностей и утилизации продукции.

К основным стадиям ЖЦ относятся: проектирование и разработка продукции, планирование и разработка процессов производства; проектирование и разработка производства; производство, логистика (процессы поставок); эксплуатация и сервисное обслуживание; утилизация продукции и ее переработка в конце полезного срока службы.

Продукция представляет собой результат некоторой деятельности или выполненных процессов. Можно выделить четыре общие категории продукции:

- техническое средство – отдельное изделие определенной формы;
- обработанный материал – изделие, являющееся результатом преобразования сырья в желаемое состояние;
- услуга – итог непосредственного взаимодействия поставщика и потребителя и внутренней деятельности поставщика по удовлетворению потребностей потребителя;
- программное обеспечение.

Многообразие процессов в ходе ЖЦ и необходимость их интенсификации требуют активного информационного взаимодействия объектов и субъектов, участвующих в поддержке ЖЦ продукции. С ростом числа участников растет объем используемой и передаваемой информации.

Потребность в создании интегрированной компьютерной системы поддержки ЖЦ изделия и организации информационного взаимодействия компонентов такой системы приводят к необходимости создания интегрированной информационной среды.

Данный подход характеризуется следующими принципиальными особенностями:

- в отличие от компьютерной автоматизации и интеграции отдельных процессов, например, в производстве, в ней решаются задачи информационной интеграции всех процессов ЖЦ;

- решаемые задачи могут выходить за границы отдельного предприятия, участники информационного взаимодействия могут быть территориально удалены друг от друга, располагаться в разных городах и даже странах;
- совместно используемая информация очень разнородна: это маркетинговые, конструкторско-технологические, производственные, технологические данные, коммерческая и юридическая информация и т. д. Для ее совместного использования должны быть стандартизованы способы, технологии представления и корректной интерпретации данных;
- основной средой передачи данных является промышленная сеть (Fieldbus), внутренняя сеть предприятия Интранет и глобальная сеть Интернет.

Впервые работы по созданию интегрированных систем, поддерживающих жизненный цикл продукции, были начаты в 80-х годах. Доказав свою эффективность, концепция последовательно совершенствовалась, дополнялась и, сохранив начальную аббревиатуру (CALS), получила более широкую трактовку: Continuous Acquisition and Life cycle Support – непрерывная информационная поддержка жизненного цикла продукции [10].

Первая часть аббревиатуры CALS – Continuous Acquisition [Support] (непрерывный сбор данных) означает непрерывность информационного взаимодействия в ходе формализации потребностей клиента, формирования заказа, процесса проектирования и изготовления и т. д. Вторая часть – Life Cycle Support (поддержка ЖЦ изделия) – означает системность подхода к информационной поддержке всех процессов ЖЦ изделия, в первую очередь, процессов эксплуатации, обслуживания, ремонта и утилизации и т. д. Более подробно развитие концепции CALS рассмотрено в [10].

В последнее время все большее распространение в мире приобретает разработанная фирмой IBM стратегия управления жизненным циклом PLM (Product Lifecycle Management), которая опирается на 3D цифровую модель продукции.

Концепция PLM предполагает, что создается единая информационная (цифровая) база, описывающая три краеугольных компонента: продукт – процессы – ресурсы и взаимосвязи между ними. Наличие такой объединенной модели обеспечивает возможность быстро, эффективно увязывать все эти три компонента, оптимизируя решение под требования бизнеса. Работа всех проектантов, конструкторов, технологов с единой моделью обеспечивает снижение издержек на многочисленные согласования, неизбежные при традиционной технологии работы, и ис-

ключает наличие дублирующих или взаимоисключающих документов. На практике это позволяет значительно сократить материальные и временные затраты на создание продукта и запуск его в производство, минуя многочисленные отладочные варианты, воплощаемые в реальности, то есть получить проект продукта, готового буквально с первых экземпляров к отправке потребителю.

Мировая практика уже имеет примеры в таких сложных отраслях, как, например, авиастроение, когда самый первый собранный самолет нового проекта после проверочных испытаний сразу передается в реальную эксплуатацию. На Западе в плане внедрения PLM с отрывом лидирует сфера машиностроения. На втором месте идут электроника и телекоммуникации, на третьем – металлургия. С заметным отставанием PLM использует военная и авиакосмическая промышленность, в химической, нефтегазовой, пищевой и других сферах промышленности порядки внедрения PLM существенно ниже.

Технология PLM позволяет за счет комплексных внедрений и реформирования производства непрерывно «CAL S-сопровождать» продукт. Эта система делает доступной информацию о продукте на любой его стадии для всех подразделений предприятия, поставщиков, партнеров, а также заказчиков и клиентов. В результате на предприятии возрастает эффективность процесса разработки продукции, существенно упрощается использование информации о продуктах, соответственно повышается скорость и качество принимаемых на всех этапах производства решений, уровень работы с поставщиками и обслуживания клиентов.

Чтобы получить все выше перечисленные преимущества на предприятии, необходима разработка интегрированной системы управления его деятельностью. И в этом смысле проектирование ИКСУ становится частью общего системно-технического синтеза ГАП, что обуславливает зависимость этого процесса от предваряющих этапов разработки организационной и функциональной структур, технологических процессов и технологической структуры ГАП. Результатом проектирования ИКСУ является разработка аппаратного, программного, математического, информационного и лингвистического обеспечений компьютерного управления технологического и производственного процессов. При этом, как и при создании любой технической системы, перед разработчиками стоят две основные проблемы. Первая – точно и детально определить, что требуется от системы, каково назначение ее подсистем, т. е. сформулировать внешние требования к проектируемой системе, непосредственно вытекающие из целей ее создания. Вторая проблема связана с выбо-

ром оптимального варианта в смысле заданного множества критериев качества реализации ИКСУ, удовлетворяющего определенным внешним требованиям (ограничениям). Сложность процесса проектирования ИКСУ приводит к ее реализации как многоэтапной процедуры с несколькими уровнями описания исходной системы.

Снизить сложность процесса проектирования позволяет последовательно-параллельная, многоэтапная, итерационная процедура, основывающаяся на разбиении системы на подсистемы с пошаговым уточнением ее характеристик. Практически все процедуры ее проектирования при этом осуществляются с использованием компьютерных технологий (в частности, CASE-систем), обеспечивающих многостороннюю помощь разработчикам при выполнении проекта.

Началом проектирования ИКСУ ГАП, как и любой сложной системы, является:

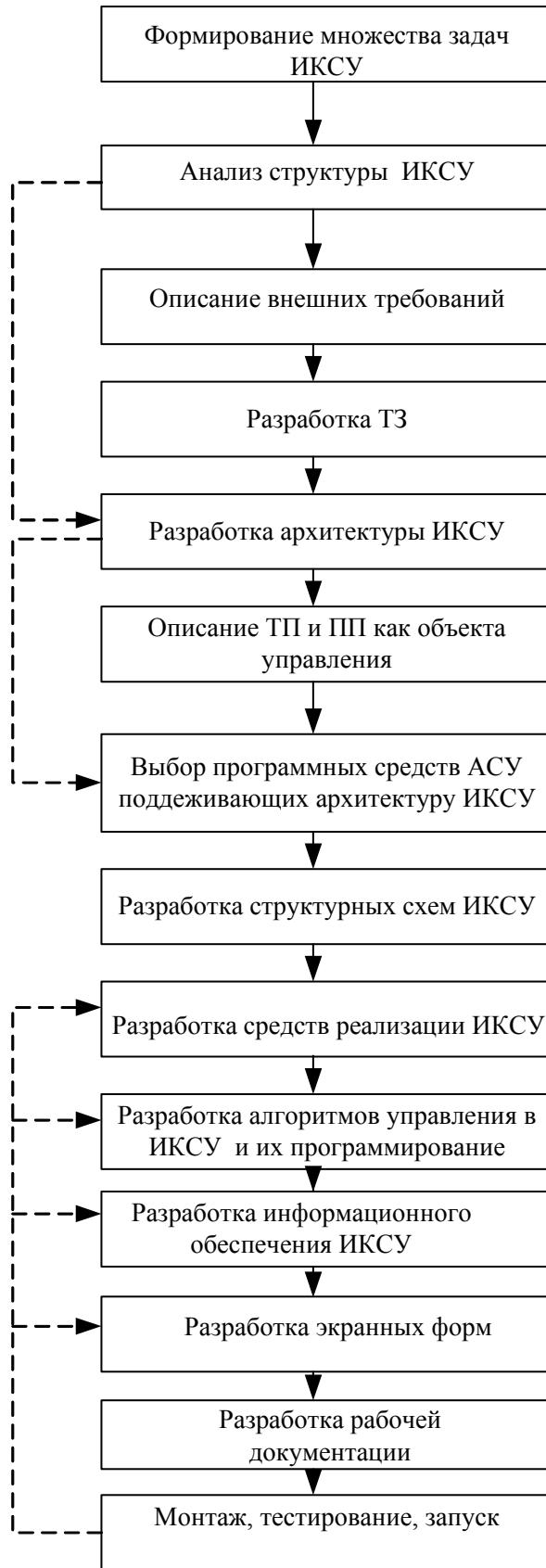
- системный анализ, заключающийся в формировании целей построения ИКСУ ГАП, концептуальной структуры (решение задач виртуального уровня для неограниченных виртуальных ресурсов системы), в описании действующих на систему факторов;
- выявление объемов контроля и управления;
- выявление состава пользователей и их обобщенных функций;
- выявление требований к интерфейсам пользователей;
- выявление потоков данных в системе управления;
- разработка иерархической структуры функций компонентов процесса в объекте деятельности.

Затем осуществляется разработка технического задания (ТЗ).

После утверждения ТЗ, осуществляется разработка архитектуры ИКСУ. Затем на физическом уровне выставляются ограничения на реальные ресурсы, обусловленные применением реальных аппаратных, программных и информационных средств. Согласование требований и возможностей приводит либо к изменениям в описаниях внешних требований, либо к выбору других вариантов средств реализации ИКСУ ГАП, либо к тому и другому.

На этапе эскизно-технического синтеза ГАП осуществляется определение вариантов основных *технических решений и выбор комплекса средств ИКСУ*. Этот этап можно рассматривать как стадию, совмещающую в себе эскизное и техническое проектирование и позволяющую подойти непосредственно к стадии рабочего проектирования. Ключевым вопросом на стадии эскизно-технического проектирования ИКСУ ГАП является выбор методов и алгоритмов реализации процессов управления функционированием ГАП в целом.





*Рис. 1. Блок схема разработки ИКСУ*

Характеристики **алгоритмов решения задач** существенно влияют на выбор комплекса технических средств, структуру и содержание информационной базы ГАП, а также на характеристики специального программного обеспечения ИКСУ ГАП. Формирование комплекса алгоритмических и программных модулей начинается уже на этапе технологического синтеза ГАП, когда осуществляется выбор основного технологического оборудования с ЧПУ, оснащенного общим программным обеспечением, которое обеспечивает работу оборудования в автоматическом режиме (исключая специальные программы управления, обработки конкретных изделий). Результатом структурного анализа является с той или иной степенью детализации формализованное алгоритмическое описание ИКСУ ГАП, определяемое термином алгоритмическая модель. Это описание фактически отражает особенности функционирования ГАП. Окончательная отработка алгоритмов достигается уже в процессе эксплуатации.

Что касается **программного и информационного обеспечения**, то оно в значительной степени формируется на этапе эскизно-технического проектирования при выборе технических средств (выпускаемых промышленностью) и архитектуры ИКСУ.

Разработка же комплекса специального программного обеспечения, в соответствии с действующими руководящими материалами, относится к стадии рабочего проекта. Управляющие программы обработки изделий для нижнего уровня управления оборудованием в соответствии со спецификацией ГАП разрабатывают постоянно в процессе его эксплуатации.

# 1. РАЗРАБОТКА КОНЦЕПТУАЛЬНОЙ СТРУКТУРЫ ИНТЕГРИРОВАННОЙ КОМПЬЮТЕРНОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ

Концептуальная структура ИКСУ разрабатывается перед техническим заданием. Она должна детализировать в общем виде состав ее подсистем. Концептуальные схемы подсистем ИКСУ приведены на рис. 1–4.

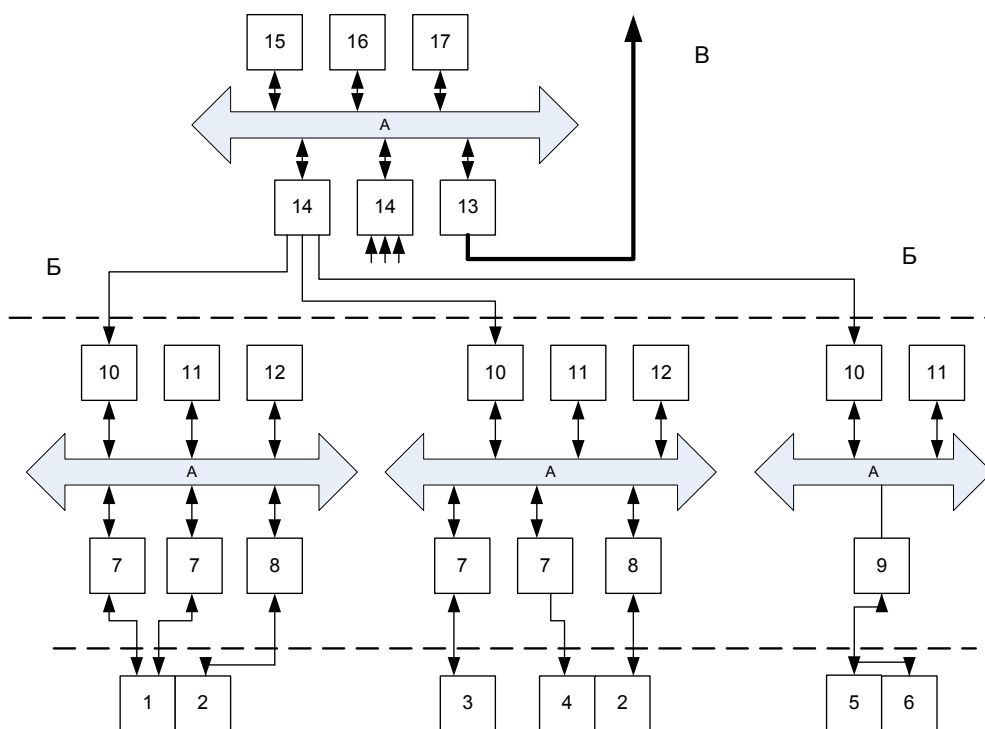


Рис. 2. Пример конфигурации ГАП механосборки

На рис. 2 показан пример концептуальной конфигурации ГАП. Здесь: 1 – сборочный робот; 2 – датчики очувствления; 3 – двухкоординатный стол; 4 – многоинструментальная сборочная головка; 5 – несинхронный конвейер; 6 – вспомогательные устройства; 7 – модуль управления степенью подвижности; 8 – модуль взаимодействия с датчиками очувствления; 9 – модуль управления дискретными входами и выходами; 10, 14 – модули межуровневой связи системы управления ГАП; 11 – модуль интерпретации программы перемещений; 12 – модуль реализации сложных перемещений; 13 – модуль связи с высшим уровнем ИКСУ ГАП; 15 – модуль оперативно-дискретного управления; 16 – модуль таймирования и диагностики; 17 – модуль генерации конфигура-

ции системы; А – мультипроцессорный интерфейс машинного контроллера; Б – «полевой» интерфейс типа Fieldbus; В – Ethernet-выход на высший уровень ИКСУ.

На рис. 3 показан пример состава концептуальных операций по наполнению общей базы данных об изделии в АСКТПП.

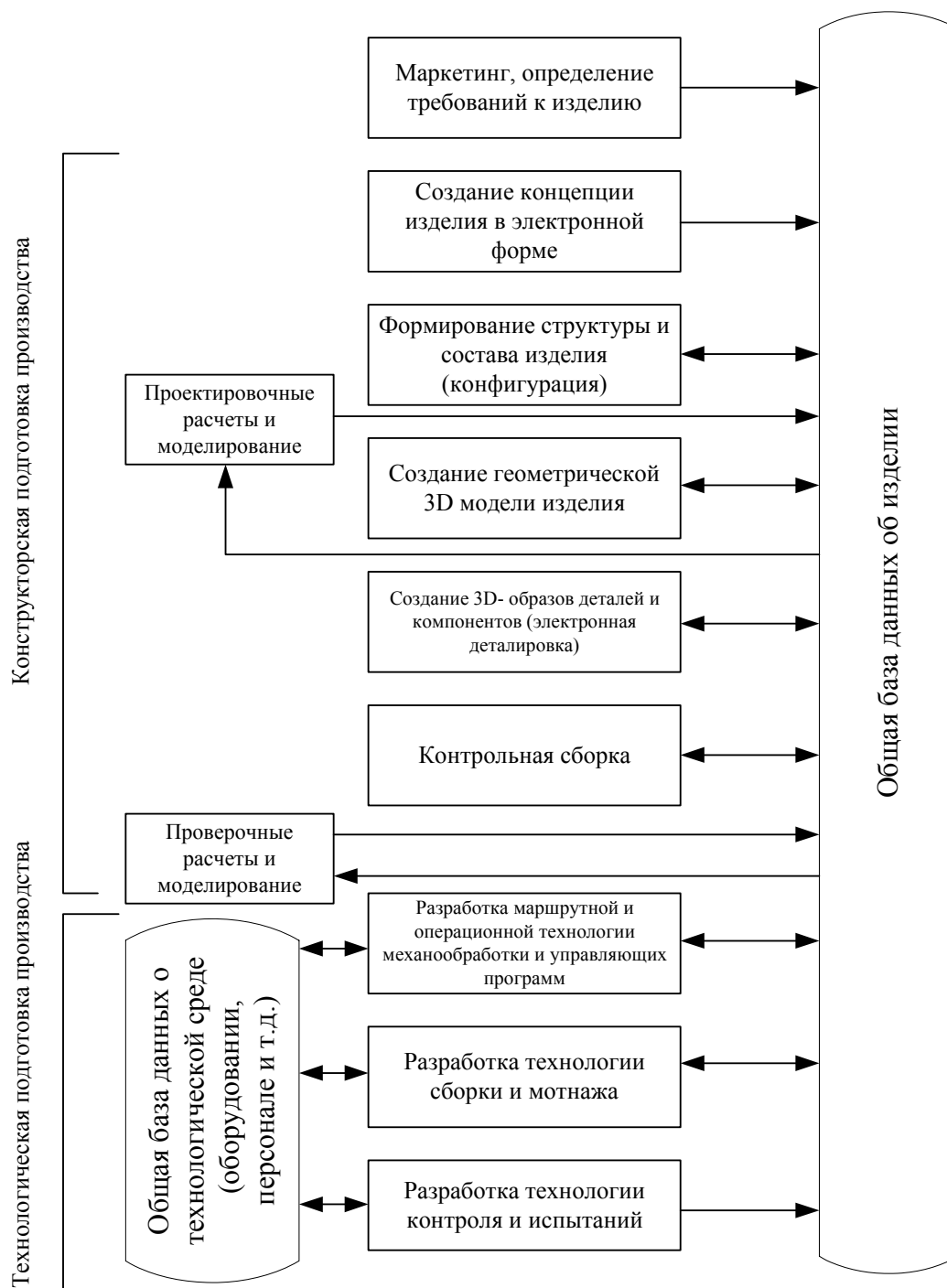


Рис. 3. Концептуальные операции по наполнению общей базы данных об изделии в АСКТПП



Концептуальным решением, приведенном на рис. 5, является то, что АРМы специалистов реализуются в подсети АСУ ТП.

Это указывает на то, что в качестве инструмента экранных форм будет использоваться ППП SCADA. Концептуально это означает то, что графика экранных форм АРМ может быть привязана к реальному времени и взаимодействие АСУ ТП с базами данных подсистем MES, CAD и ERP будет осуществляться через буферную зону (БД SQL). Это важно для физического или виртуального разделения локальных под-сетей (ЛВС) АСУ ТП и АСУПП.

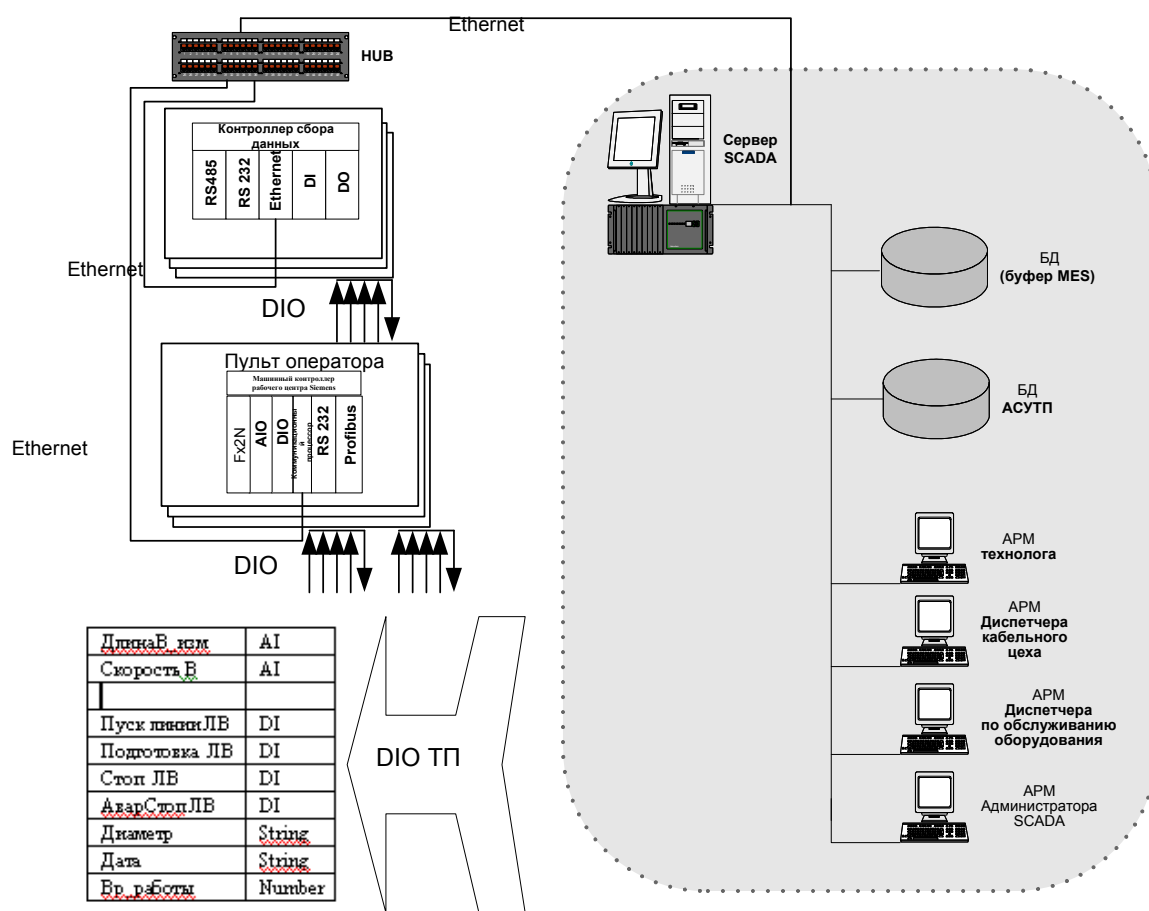


Рис. 6. Структурная схема ИКСУ

Цифровая модель (обобщенная БД об изделии) при концептуальном рассмотрении должна содержать, как геометрию изделия, так и все необходимые расчетные данные, карты технологических процессов, ведомости, управляющие программы для станков, электронные описания изделия и технические руководства. Эту задачу можно решить за счет создания единого информационного пространства предприятия, другими словами, единого пространства цифровых данных о корпоративной продукции. В результате конструкторы, технологи и другие специалисты бу-

дуг получать не только информацию об изделии, но и дополнять ее, формируя состав изделия и тем самым актуализируя конструкторско-технологическую информацию для разных служб предприятия. В дальнейшем, после изготовления изделия, информация о нем будет использована сервисными подразделениями для планового обслуживания, заказчиком – для конфигурирования готовой продукции под свои специфические потребности, а инженерным составом – для модернизации и изготовления нового изделия на основе уже спроектированного.

Концепция коммуникационной среды передачи данных может быть представлена в виде, показанном на рис. 6. В качестве коммуникационных каналов связи межуровневого взаимодействия здесь предлагается использовать Ethernet – связь. Это показано на рисунке. Однако проектировщик может обосновать выбор иного варианта, например, Profibus или RS-485. В зависимости от этого выбора состав модульного расширения будет разным.

## 2. РАЗРАБОТКА ТЕХНИЧЕСКОГО ЗАДАНИЯ

Техническое задание формируется по результатам проведённого предпроектного исследования и разработки концептуальных решений ИКСУ.

Разработка ТЗ ведётся в соответствии со стандартами:

ГОСТ 34.601–90. *Информационная технология. Комплекс стандартов на автоматизированные системы. Автоматизированные системы. Стадии создания;*

ГОСТ 34.602–89. *Комплекс стандартов на автоматизированные системы. Техническое задание на создание автоматизированной системы.*

Техническое задание на автоматизированную систему с учётом требований *ГОСТ 34.602–89* содержит следующие разделы:

- общие сведения;
- назначение и цели создания (развития) системы;
- характеристика объектов автоматизации;
- требования к системе;
- состав и содержание работ по созданию системы;
- порядок контроля и приемки системы;
- требования к составу и содержанию работ по подготовке объекта автоматизации к вводу АС в действие;
- требования к документированию;
- источники разработки;
- приложения.

В зависимости от вида, назначения, специфических особенностей объекта автоматизации и условий функционирования системы допускается оформлять разделы ТЗ в виде приложений, вводить дополнительные, исключать или объединять подразделы ТЗ.

ТЗ должно соответствовать современному уровню развития науки и техники, максимально точно отражать цели, замысел и требования к создаваемой системе и при этом не ограничивать разработчика в поиске и реализации наиболее эффективных технических, технико-экономических и других решений. В соответствии с *ГОСТ 34.601–90*, после согласования с Заказчиком, выполняется разработка, оформление, согласование и утверждение Технического задания на АС (при необходимости – на части АС). Данный стандарт также определяет состав участников проектирования и реализации проектных решений, которые участвуют в составлении и(или) согласовании ТЗ. В самом общем случае к ним относятся:

- организация-заказчик (пользователь), для которой создаётся АС и которая обеспечивает финансирование, приёмку работ и эксплуатацию как по всей АС, так и по отдельным её компонентам;



- организация-разработчик (генпроектировщик), осуществляющая работы по созданию АС, представляя Заказчику совокупность научно-технических услуг на разных стадиях и этапах создания, а также разрабатывая и поставляя различные программные и технические средства АС. Данная (головная) организация может пользоваться услугами других организаций, работающих у неё на субподряде;
- организация-поставщик, изготавливающая и (или) поставляющая программные и технические средства по заказу Разработчика или Заказчика;
- организации, выполняющие строительные, электротехнические, санитарно-технические, монтажные, наладочные и другие подготовительные работы, связанные с созданием АС.

ГОСТ 34.602–89 устанавливает порядок разработки, согласования и утверждения ТЗ на создание (развитие или модернизацию) автоматизированных систем различного назначения, а также состав и содержание указанного документа независимо от того, будет ли она работать самостоятельно или в составе другой системы. В зависимости от условий создания системы возможны различные совмещения функций заказчика, разработчика, поставщика и других организаций, участвующих в работах по созданию АСУ.

ТЗ на ИКСУ разрабатываются на основании исходных данных. Это означает, что Заказчик должен предоставить исполнителю документацию на оборудование ГАП, существующие на предприятии АСУ.

#### Раздел «Общие сведения»

- Полное наименование системы и её условное обозначение.
- Наименование и реквизиты предприятий (объединений) разработчика и заказчика системы.
- Перечень документов, явившихся основанием создания системы, кем и когда они утверждены.
- Возможные сроки начала и окончания работ по созданию системы.
- Сведения об источниках и порядке финансирования работ.
- Порядок оформления и предъявления заказчику результатов работ по созданию системы или её частей, по изготовлению и наладке отдельных средств (технических, программных, информационных) и программно-технических комплексов системы.

#### Раздел «Назначение и цели создания (развития) системы»

- Под «Назначением системы» понимается вид автоматизируемых процессов (деятельности) и перечень предполагаемых к использованию объектов.
- В пункте «Цели создания системы» приводятся наименования и требуемые значения технических, технологических, производ-

ственно-экономических и других показателей объекта автоматизации, достигаемые в результате создания АС, указываются критерии оценки достижения целей создания системы.

Раздел «*Характеристики объекта автоматизации*»

- Краткие сведения об объекте автоматизации или ссылки на документы, содержащие эти данные.
- Сведения об условиях эксплуатации объекта автоматизации.
- Характеристики внешней среды, в которой функционирует объект автоматизации.

Раздел «*Требования к системе*» содержит подразделы с требованиями к системе в целом, функциям (задачам), выполняемым системой, видам обеспечения.

*Требования к численности и квалификации персонала АС* содержат требования к численности персонала и пользователей АС; квалификации персонала, порядку его подготовки, контролю знаний и навыков; режиму работы персонала АС.

*Требования по безопасности* включают требования по обеспечению безопасности при монтаже, наладке, эксплуатации, обслуживании и ремонте технических средств системы (защита от воздействия электрического тока, электромагнитных полей, акустических шумов и т. п.), допустимым уровням освещённости, вибрационных и шумовых нагрузок.

*Требования по сохранности информации* содержат перечень событий: аварий, отказов технических средств (в т. ч. потерей питания) и т. п., при которых должна быть обеспечена сохранность информации в системе, а также требования к подсистеме резервного копирования и архивного хранения документов и данных.

В *требования к защите информации от несанкционированного доступа* включают требования, действующей в отрасли (ведомстве) заказчика.

В *требования по эргономике и технической эстетике* включают показатели АС, задающие необходимое качество взаимодействия человека с машиной и комфортность условий работы персонала.

*Требования к стандартизации и унификации* включают показатели, устанавливающие соответствие с государственными стандартами, ведомственными и другими нормами.

В *дополнительные требования* могут быть включены:

- требования к оснащению системы устройствами для обучения персонала (тренажерами, другими устройствами аналогичного назначения) и документацией на них;
- требования к сервисным средствам, стендам для проверки элементов системы;

- требования к системе, связанные с особыми условиями эксплуатации;
- специальные требования по усмотрению разработчика или заказчика системы.

Подраздел «*Требования к видам обеспечения*» в зависимости от вида системы может содержать требования к математическому, информационному, лингвистическому, программному, техническому, организационному, методическому и другим видам обеспечения системы.

В части *требований к математическому обеспечению* системы приводятся требования к составу, области применения (ограничения) и способам использования в системе математических методов и моделей, типовых алгоритмов и алгоритмов, подлежащих разработке.

В части *требований к информационному обеспечению* системы приводят требования:

- к составу, структуре и способам организации фондов и машиночитаемых данных в системе;
- к информационному обмену между компонентами системы;
- к информационной совместимости со смежными системами;
- по использованию коммуникативных форматов, унифицированных документов, действующих в данной организации и (или) взаимодействующей группе организаций;
- к внутрисистемным форматам данных;
- по применению систем управления базами данных;
- к структуре процесса сбора, обработки, передачи данных в системе и представлению данных;
- к защите данных от разрушений при авариях и сбоях в электропитании системы;
- к контролю, хранению, обновлению и восстановлению данных.

В части *требований к лингвистическому обеспечению* системы приводятся требования к применению в системе:

- классификаторов и тезаурусов,
- языков взаимодействия пользователей и технических средств системы,
- средств кодирования и декодирования данных,
- конверторов,
- языков ввода-вывода данных,
- языков манипулирования данными,
- способов организации диалога.

В части *требований к программному обеспечению АС* приводятся общие функциональные и общесистемные требования к приобретаемым и вновь разрабатываемым программным продуктам. При этом следует предусмотреть:

- решение средствами ПО системы полного комплекса служебных и пользовательских задач;
- поддержку возможностей обработки, хранения и актуализации заданных видов документов и данных с учётом необходимых их количественных показателей;
- поддержку возможности настройки на заданные входные и выходные формы документов;
- поддержку необходимых форматов данных и средств лингвистического обеспечения;
- поддержку требований протоколов телекоммуникационного обмена данными, действующими в области функционирования АС,
- обеспечение необходимой для создаваемой АС скорости обработки и поиска данных,
- обеспечение требований стандартизации, унификации, эргономики, защиты информации и соответствия другим, не перечисленным в данном пункте, требованиям, включённым в другие пункты ТЗ.

В части *требований к средствам технического обеспечения системы* приводят требования к видам технических средств, в том числе к видам комплексов технических средств, программно-технических комплексов и других комплектующих изделий, допустимых к использованию в системе, а также к функциональным, конструктивным и эксплуатационным характеристикам средств технического обеспечения системы.

В части *требований к организационному обеспечению* приводят требования к структуре и функциям подразделений, участвующих в функционировании системы или обеспечивающих эксплуатацию; организации функционирования системы и порядку взаимодействия персонала АС с персоналом объекта автоматизации; защите от ошибочных действий персонала системы.

В *требования по обеспечению управления и контроля* включают:

- перечень контролируемых параметров технологической цепи обработки входных документов и обслуживания пользователей,
- требования к регламенту обработки входных документов и обслуживания пользователей,
- требования к видам статистической обработки контролируемых данных, а также их выходным формам,
- требования к средствам формально-логического контроля.

Раздел «*Состав и содержание работ по созданию (развитию) системы*» должен содержать перечень стадий и этапов работ по созданию системы в соответствии с ГОСТ 34.601–90, сроки их выполнения, перечень организаций-исполнителей работ, ссылки на документы, подтверждающие их согласие на участие в создании системы и т. п.

В разделе «*Порядок контроля и приемки системы*» указывают:

- виды, состав, объём и методы испытаний системы и её составных частей (виды испытаний в соответствии с действующими нормами, распространяющимися на разрабатываемую систему);
- общие требования к приемке работ по стадиям (перечень участвующих организаций, и/или юридических и физических лиц, место и сроки проведения), порядок согласования и утверждения приёмочной документации;
- статус приёмочной комиссии (государственная, межведомственная, ведомственная и т. п.).

В разделе «*Требования к составу и содержанию работ по подготовке объекта автоматизации к вводу системы в действие*» необходимо привести перечень основных мероприятий, которые следует выполнить при подготовке объекта автоматизации к вводу АИС в действие, и их исполнителей.

В разделе «*Требования к документированию*» приводят:

- согласованный разработчиком и заказчиком системы перечень подлежащих разработке комплектов и видов документов, в т. ч. выпускаемых на машинных носителях;
- требования по документированию комплектующих элементов межотраслевого применения в соответствии с требованиями ЕСКД и ЕСПД;
- при отсутствии государственных стандартов, определяющих требования к документированию элементов системы, дополнительно включают требования к составу и содержанию таких документов.

Обеспечение качества проектной документации относится к возможностям средств проектирования анализировать и проверять описания и документацию на полноту и непротиворечивость, а также на соответствие принятым стандартам и правилам (включая ГОСТ, ЕСПД).

В разделе «*Источники разработки*» должны быть перечислены документы и информационные материалы (технико-экономическое обоснование, отчеты о законченных научно-исследовательских работах, информационные материалы на отечественные, зарубежные системы-аналоги и др.), на основании которых разрабатывалось ТЗ и которые должны быть использованы при создании системы.

В состав ТЗ на АС включают приложения, содержащие расчёт ожидаемой эффективности системы; оценку научно-технического уровня системы; использованные при разработке ТЗ методические и наиболее важные информационные материалы из состава документов указанных в разделе «*Источники разработки*».

Дополнительные рекомендации по составу и содержанию технического задания на автоматизированные системы различного назначения и

приложений к ним содержатся также в РД 50-640-87 и ГОСТ 24.602–86, ГОСТ 21.408–93 «Правила выполнения рабочей документации автоматизации технологических процессов основной комплект рабочих чертежей систем автоматизации».

*Состав основного комплекта рабочих чертежей систем автоматизации.* В основной комплект рабочих чертежей систем автоматизации (далее основной комплект) в общем случае включают:

- общие данные по рабочим чертежам;
- схемы автоматизации;
- схемы принципиальные (электрические, пневматические);
- схемы (таблицы) соединений и подключения внешних проводок;
- чертежи расположения оборудования и внешних проводок;
- чертежи установок средств автоматизации.

Объекты управления (отделения, системы, установки, агрегаты, аппараты) и относящиеся к ним средства автоматизации, не связанные между собой и имеющие одинаковое оснащение системами автоматизации, изображают на схемах и планах расположения один раз, поясняя текстовыми указаниями.

Основной комплект допускается оформлять самостоятельными документами с присвоением им базового обозначения (например, в ТПУ ФЮРА. ОКП) и добавлением порядкового номера документа (арабскими цифрами).

Пример – ФЮРА.425400.098 ПЗ и т. д.

Для объектов с небольшим объемом монтажных работ по авто- допускается объединять рабочие чертежи автоматизации различных технологических процессов и инженерных систем в один основной комплект, если их монтаж осуществляет одна монтажная организация. Объединенному основному комплекту присваивают марку АК.

В случае применения приборов с радиоизотопными методами измерения рабочие чертежи для их монтажа выделяют в самостоятельный основной комплект.

Общие данные по рабочим чертежам (далее – общие данные) выполняют по ГОСТ 21.101. При этом ведомость спецификаций не составляют.

Дополнительно к указанным в ГОСТ 21.101 данным включают:

- таблицу исходных данных и результатов расчетов сужающих устройств (не поставляемых промышленностью) по форме 1\* согласно ГОСТ 21.101;
- таблицу исходных данных и результатов расчетов регулирующих органов по форме 2 ГОСТ 21.101;
- перечень закладных конструкций, первичных приборов (размещаемых на технологическом, санитарно-техническом и другом оборудовании и коммуникациях) по форме 3 ГОСТ 21.101.

В перечень закладных конструкций, первичных приборов и средств автоматизации включают:

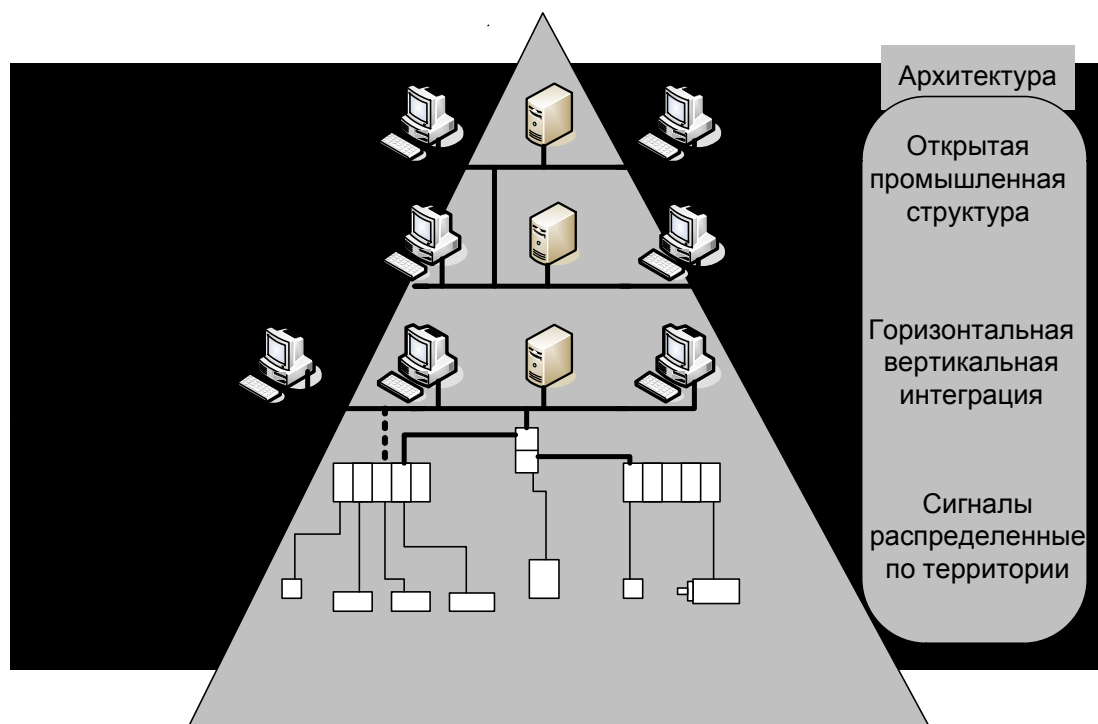
- закладные конструкции, предназначенные для установки приборов измерения температуры, отборных устройств давления, уровня, состава и качества вещества;
- первичные приборы (объемные и скоростные счетчики, сужающие устройства, ротаметры, датчики расходомеров и концентратомеров);
- датчики уровнемеров и сигнализаторов уровня;
- регулирующие клапаны.

### 3. ПРОЕКТИРОВАНИЕ АРХИТЕКТУРЫ ИКСУ

Целью ИКСУ является обеспечение условий для взаимосвязанного, согласованного управления конструкторско-технологической подготовкой производства и управления производственными и технологическими процессами.

Методологией проектирования ИКСУ является разделение объектов автоматизации (систем автоматизированного проектирования, технологического и производственного процессов) на части, позволяющие осуществить эффективную автоматизацию каждой из них и автоматизацию в целом.

Применительно к иерархически организованной системе управления различают горизонтальную и вертикальную интеграции (рис. 7).



*Рис. 7. Иерархическая структура системной интеграции автоматизированной системы*

В общем случае горизонтальная интеграция предполагает объединение АС одного уровня (например, автономных систем автоматизации проектных работ, технологических или производственных процессов), а вертикальная – разных уровней.

В частности, вертикальная интеграция предполагает объединение между собой систем автоматизированного проектирования, систем ав-



томатизации технологических и производственных процессов, а также корпоративных систем (планово экономических, логистических, финансовых, управление персоналом) в единую интегрированную информационную сеть, что обеспечивает необходимый обмен данными в реальном масштабе времени между всеми подразделениями управленческого уровня, основного и вспомогательного производства.

Целью межуровневой и внутриуровневой интеграции является установление рациональных способов организации взаимосвязи и взаимодействия частей одного иерархического уровня и различных уровней

В настоящее время в ИКСУ вертикальная интеграция формируется путем организации потоков информации от нижнего уровня (датчиков и контроллеров технологического оборудования, АСУ ТП), от конструкторской документации САПР во внутренние вычислительные сети участков и цехов (MES), и далее в вычислительные сети предприятия в целом (КИС) (ERP, MRP).

Попытки унификации технологий управления на каждом из этих уровней привело к возникновению, так называемой, архитектурной концепции построения системной интеграции. В ее основе лежит технология открытых систем.

Сущность технологии открытых систем состоит в формировании среды, включающей программное обеспечение, аппаратные средства, службы связи, интерфейсы, форматы данных и протоколы, обеспечивающей переносимость, взаимосвязь и масштабируемость приложений и данных.

Совокупность этих качеств достигается использованием развивающихся, общедоступных и общепризнанных стандартов на продукты информационных технологий, составляющих среду открытой системы.

Основным приемом построения корректной архитектуры ИКСУ служит функциональная стандартизация или построение функционального стандарта – профиля.

Профиль – это согласованный набор базовых стандартов, предназначенный для решения какой-либо задачи или класса задач (в частности, автоматизации предприятия). Его построение позволяет проектировать и развивать ИКСУ наиболее экономичным образом. Если все программно-аппаратные средства, поставляемые различными производителями, соответствуют профилю, т. е. выполнены в соответствии с необходимыми стандартами, то они будут работать в единой среде, где будет обеспечена переносимость приложений, взаимодействие и функциональная расширяемость. На современном этапе развития системной интеграции этот профиль строится путем применения архитектуры моделей.

В основе современных архитектур ИКСУ лежат две группы моделей: CIM (Computer-Integrated Manufacturing) – модель объектов данных

с описанием информации, циркулирующей в ИКСУ и PERA/SCOR – операционные модели, определяющие процессы преобразования информации в ИКСУ. Выбор модели зависит от цели проектирования ИКСУ, но при любом выборе в этих моделях выделяют четыре общих групп стандартов:

- стандартов на уровни;
- стандартов на информационные потоки;
- стандартов на интерфейсы;
- стандартов на операции и функции.

Требования этих стандартов описаны в следующих документах: S-88, MES, S 95, OPC, PROFINET (IEC 61158), ODBC (Open DataBase Connectivity), SQL, CALS, PLM.

Стандарт S88 направлен на увеличение гибкости и прозрачности оборудования и программного обеспечения. Он «обслуживает» так называемые batch-процессы и устанавливает рекомендации по решению задач, связанных с управлением оборудованием, безопасностью, производственными рисками и контролем производственных операций. Batch-процесс определяется как «процесс выпуска конечного количества продукции на основе обработки конечного количества входных материалов в соответствии с указанной рецептурой на одной или более единицах оборудования». В отличие от непрерывного производства, batch-процессы основаны на использовании ограниченного количества материала, называемого партией. Такие процессы характерны для ГПС.

В соответствии с требованиями стандарта ISA S88.01-1995 (его IEC эквивалент – IEC 61512-1-1998) при проектировании ИКСУ должна быть разработана модель состояний ГПС и технологического процесса в целом, которую иногда называют виртуальной машиной состояний.

Поведение оборудования планируется в виде диаграммы состояний. В любой момент времени оборудование может находиться в одном из предполагаемых состояний – Остановка, Сброс, Пуск, Работа, Подготовка, Авария и т. п.

Фаза «Подготовка», в частности, позволяет:

- конфигурировать последовательность состояний
- управлять переходами посредством стандартного пользовательского интерфейса непосредственно в контроллере
- планировать поведение оборудования при возникновении различных ситуаций, и вместе с тем, получить простую и структурированную программу.

При использовании рекомендаций этого стандарта контроллер будет использовать виртуальную машину состояний для определения состояния оборудования в любой момент времени и управлять им.

Стандарт ISA 95 отвечает за решение задач операционного менеджмента средствами информационных систем. Он определяет интерфейсы между бизнес-функциями и производственными операциями и служит для интегрирования традиционных систем управления ERP, MES и DCS. Стандарт описывает современную модель производственных операций, получившую развитие в системах для исполнения производственной деятельности (рис. 8), и содержит примеры документов отчетности и аналитических зависимостей, используемых для оценки эффективности производства. Особенности стандарта являются детальное описание предметной области цеховых информационных систем в виде диаграмм UML, описание операционной модели, а также спецификация основных трансфертных объектов, используемых в интерфейсах интеграции внутрицеховых приложений.

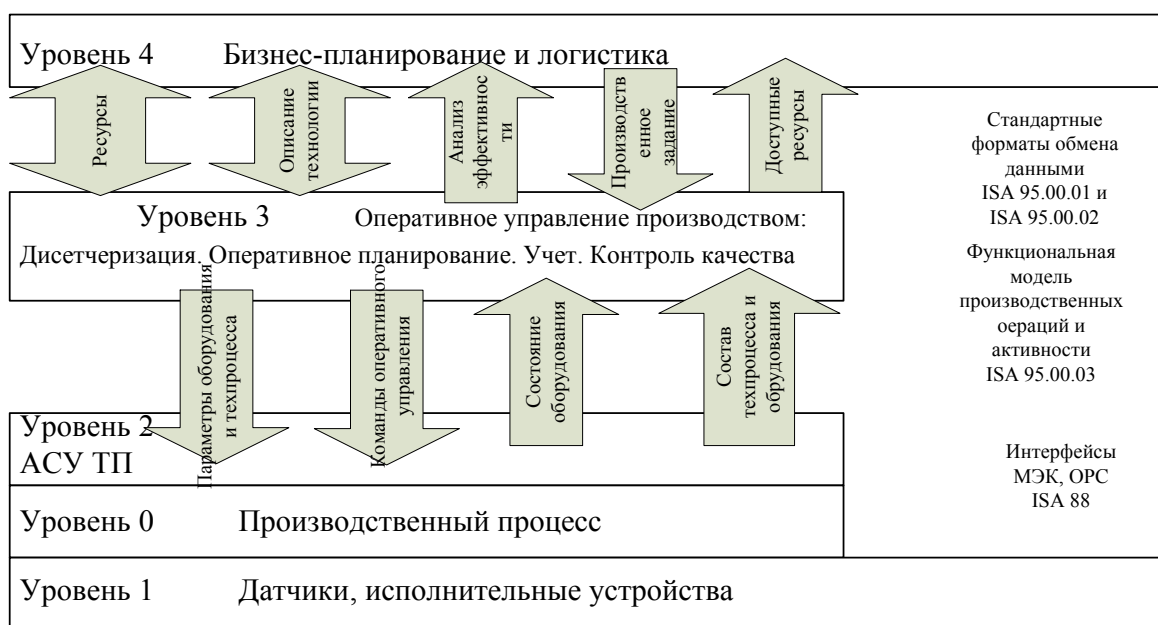


Рис. 8. Иерархическая модель управления согласно ISA 95

В первой части ISA-95.00.01 рассматривается многоуровневая модель обмена информацией и связи между функциями бизнес-планирования и логистики (уровень 4) и производственными подразделениями (уровень 3).

Вторая часть стандарта определяет форматы обмена данными через эти связи в соответствии со схемой взаимодействия Business to Manufacturing Markup Language. Здесь определены форматы документов для обмена информацией по оборудованию, материалам, персоналу, материалоемкости продукции, технологии изготовления, производственным заданиям и эффективности техпроцессов.

Третья часть ISA-95 описывает модели и действия, характерные для уровня управления производством (уровень 3), которые обычно поддерживаются системами:

- исполнения производственной деятельности – MES (Manufacturing Execution Systems);
- контроля качества – LIMS (Laboratory Information Management System);
- автоматизированного управления активами предприятия EAM (Enterprise Asset Management), поддерживающими весь жизненный цикл оборудования.

ISA-95.00.03 также расширяет дополнительными функциями термин MES до современного уровня его понимания ассоциацией MESA (Manufacturing Execution Enterprise Solutions Association), добавляя новые модели движения производственных запасов, управления техобслуживанием, лабораторных анализов качества и др.

Модель управления производством не определяет приложения, поддерживающие рассматриваемые функции, а описывает различные задачи и их взаимосвязи. Такой подход считается общепринятым при позиционировании архитектурных решений ИКСУ.

Модель производства приводится в действие планами производства (составляемыми на уровне бизнес-систем при взаимодействии с клиентами и поставщиками), которые затем спускаются на производство, где по ним составляются детальные графики производства, содержащие рабочие производственные задания, определяющие по времени действия и события, возникающие при их выполнении. Часть информации, поступающей ниже на уровень 2, определяется стандартами ISA-88, OMAC, OPC, Fieldbus и др.

Модели деятельности при управлении производственными процессами рассмотрены в ISA-95.00.04.

Пятый раздел стандарта посвящен транзакциям между бизнес-приложениями и производством. В управление производственными ресурсами входят функции управления персоналом, оборудованием и материалами, которые регулируют как текущий статус, так и доступность ресурсов в будущем (отпуск, плановое обслуживание и ремонт). Имеются также функции для управления рецептурой и технологией производства продукции. Часть информации по ним обрабатывается совместно с системами планирования ресурсов MRP и управления жизненным циклом продукции PLM на уровне финансово-хозяйственной деятельности предприятия.

MES – это исполнительная система производства. Системы такого класса решают задачи синхронизации, координируют, анализируют и

оптимизируют выпуск продукции в рамках какого-либо производства и обеспечивают:

- 1) активацию производственных мощностей;
- 2) отслеживание производственных мощностей;
- 3) сбор информации, связанной с производством, от систем автоматизации производственного процесса; сенсоров; персонала; программных систем;
- 4) отслеживание и контроль параметров качества;
- 5) информирование персонала и оборудования информацией, необходимой для начала процесса производства.
- 6) установление связей между персоналом и оборудованием в рамках производства;
- 7) установление связей между производством и поставщиками, потребителями, инженерным отделом, отделом продаж и менеджментом;
- 8) реагирование на
  - требования по номенклатуре производства,
  - изменение компонентов, сырья и полуфабрикатов, применяемых в процессе производства,
  - изменение спецификации продуктов,
  - доступность персонала и производственных мощностей.

*Стандарты OPC [COM (Component Object Model), DCOM (распределенная COM) и DNA for Manufacturing (Distributed interNet Applications for Manufacturing) компании Microsoft, Java компании Sun Microsystems со своими объектами JavaBeans и апплетами, а также Sun Connect компании Sun Microsystems]* – это стандарты подключаемости компонентов ИКСУ. Они разработаны с целью сокращения затрат на создание и сопровождение приложений промышленной автоматизации. Их применение при проектировании архитектуры ИКСУ решает вопросы обмена данными с устройствами разных производителей или по разным протоколам обмена данными. Наиболее применяемым в ИКСУ является стандарт OPC.

OPC (OLE for Process Control) это программная технология на базе Windows-технологий (OLE, ActiveX, COM/DCOM), предоставляющая единый интерфейс для управления объектами автоматизации и технологическими процессами.

Девиз OPC: *открытые коммуникации по открытым протоколам.* OPC – это набор спецификаций стандартов. Каждый стандарт описывает набор функций определенного назначения. Текущие стандарты:

*OPC DA (Data Access)* описывает набор функций обмена данными в реальном времени с ПЛК, РСУ, ЧМИ, ЧПУ и другими устройствами;

*OPC AE (Alarms & Events)* предоставляет функции уведомления по требованию о различных событиях: аварийные ситуации, действия оператора, информационные сообщения и другие;

*OPC Batch* предоставляет функции шагового и рецептурного управления технологическим процессом (в соответствии с стандартом S88.01);

*OPC DX (Data eXchange)* предоставляет функции организации обмена данными между OPC-серверами через сеть Ethernet. Основное назначение – создание шлюзов для обмена данными между устройствами и программами разных производителей;

*OPC HDA (Historical Data Access)* предоставляет доступ к уже сохраненным данным;

*OPC Security* определяет функции организации прав доступа клиентов к данным системы управления через OPC-сервер;

*OPC XML-DA (XML-Data Access)* предоставляет гибкий, управляемый правилами формат обмена данными через SOAP и HTTP.

Суть OPC проста – предоставить разработчикам промышленных программ универсальный фиксированный интерфейс (то есть набор функций) обмена данными с любыми устройствами ИКСУ. В свою очередь разработчики устройств ввода-вывода данных дополняют последние специальной программой, реализующей этот интерфейс (набор функций). Полезность применения OPC с точки зрения интеграции вытекает из самой сути OPC. Первое преимущество – если заменяется какой-нибудь компонент ИКСУ, то нет нужды корректировать другое ПО, так как при замене драйвера поверх него будет работать инсталлированный OPC. Это значит, что при включении в ИКСУ нового компонента необходимо будет лишь правильно его сконфигурировать на программном уровне. Второе – если в систему добавить новые программы, нет необходимости предусматривать разработку для них драйверов или интерфейсов связи, кроме как конфигурирования OPC-клиента. Это позволяет разработчику ИКСУ сконцентрировать свое внимание на проектных решениях ИКСУ.

На данный момент используется OPC версии 3.0, однако более распространенной версией пока является 2.1. Недавно разработанный стандарт OPC UA (Unified Architecture) унифицирует набор функций для обмена данными, регистрации событий, хранения данных, обеспечения безопасности данных.

Чаще всего для создания приложений с поддержкой OPC используют языки программирования C++ или Visual Basic.

Исходя из области применения OPC-серверов, в АСУ предприятия различают несколько уровней управления:

- нижний уровень – полевые шины (fieldbus) и отдельные контроллеры;
- средний уровень – цеховые сети;
- уровень АСУ ТП – уровень работы систем типа SCADA;
- уровень АСУП – уровень приложений управления ресурсами предприятия.

На каждом из этих уровней могут быть несколько OPC-серверов, которые поставляют свои данные OPC-клиенту на более высоком уровне или «соседу» по уровню.

Если имеется оборудование, например плата АЦП, декодер штрих-кода, измеритель веса, управляемые через свои драйверы на компьютере с Windows или другой ОС и поддерживающие COM/DCOM, то это самые главные кандидаты на реализацию OPC-серверов, которые можно установить непосредственно поверх их драйверов.

*CALS стандарты* – это архитектурная поддержка сбора данных в течение жизненного цикла продукции. Она обеспечивает единообразные способы управления процессами и взаимодействия всех участников этого цикла: заказчиков продукции, поставщиков/производителей продукции, эксплуатационного и ремонтного персонала. На предприятии CALS реализуется в соответствии с требованиями системы международных стандартов, регламентирующих правила указанного взаимодействия преимущественно посредством электронного обмена данными.

Применение CALS-технологий [10, 13] позволяет существенно сократить объёмы проектных работ, так как описания многих составных частей оборудования, машин и систем, проектировавшихся ранее, хранятся в унифицированных форматах данных сетевых серверов, доступных любому пользователю технологий CALS. Существенно облегчается решение проблем ремонтпригодности, интеграции продукции в различного рода системы и среды, адаптации к меняющимся условиям эксплуатации, специализации проектных организаций и т. п. Главная задача такого решения – обеспечение единообразного описания и интерпретации данных, независимо от места и времени их получения в общей системе, имеющей масштабы вплоть до глобальных. Структура проектной, технологической и эксплуатационной документации, языки её представления должны быть стандартизированными. Тогда становится реальной успешная работа над общим проектом разных коллективов, разделённых во времени и пространстве и использующих разные, в том числе и CAD-CAM-системы. Одна и та же конструкторская документация может быть использована многократно в разных проектах, а одна и та же техно-логическая документация адаптирована к разным производственным условиям, что позволяет существенно сократить и удешевить общий цикл проектирования и производства. Кроме того, упрощается эксплуатация систем.

Для обеспечения информационной интеграции в качестве форматов данных используются стандарты ГОСТ Р ИСО 10303. В CALS входят также стандарты электронного обмена данными, электронной технической документации и руководства для усовершенствования процессов.



*PLM* – это множество стандартов, которые обеспечивают компании успешное внедрение *CALS* технологии и инноваций в разработку и производство конкурентоспособной продукции низкой стоимости.

*PLM* – это стратегический бизнес-подход, который применяет согласованный набор бизнес-решений по поддержке коллективного процесса разработки, управления, передачи и использования информации об изделии от концепции до утилизации. Он реализуется в рамках предприятия на основе интеграции людей, процессов и информации.

Вариантов технической реализации и конкретных средств, предлагаемых различными производителями в рамках системной интеграции, достаточно много, однако в целом облик программно-технической структуры системной интеграции практически приближается к некоторой унифицированной форме в виде продуктов ведущих мировых системных интеграторов для промышленных предприятий *CATIA*, *ENOVIA*, *SMARTEAM* и *DELMIA* (Dassault Systems), *PI System* (OSI Software), *Total Plant Solution* (Honeywell), *FactorySuite* (Wonderware), *Enterprise Technology Solution* (Yokogawa), *Mizushima Plant* (Mitsubishi Chemical Co), *Plant Information Management System* (JGC Corporation)).

По существу, эти решения представляют собой переход к архитектурным решениям *CALS*-технологии, основой которой являются следующие базовые принципы:

- прикладные программные средства должны быть отделены от данных;
- структуры данных и интерфейсы доступа к ним должны быть стандартизованы;
- данные об изделии, процессах и ресурсах не должны дублироваться.

В результате этого число ошибок минимизируется и тем самым обеспечивается полнота и целостность информации.

При этом предполагается, что единый центр оперативного управления, оснащенный автоматизированной системой диспетчерского управления (*SCADA*-системой), должен осуществлять решение таких задач, как

- оперативный мониторинг производственного и технологического процессов, осуществляемый в реальном масштабе времени;
- получение и обработка технологических, производственной информации и указаний (заданий) от верхнего (стратегического) звена управления предприятием;
- оперативное корректирующее управление материальными и энергетическими потоками в соответствии с изменениями производственной ситуации и указаниями вышестоящего уровня управления;
- оперативное корректирующее управление запасами и производственными ресурсами;



- мониторинг и управление качеством производства;
- контроль и, при необходимости, корректирующее воздействие по управлению отдельными, наиболее важными технологическими установками (рабочими центрами);
- прогностический анализ возникновения сбоев, отказов и аварийных ситуаций и формирование демпфирующих корректирующих управлений;
- автоматизированное накопление и хранение производственного опыта в информационном хранилище и т. п.

При этом, в соответствии с системным подходом, отдельное технологическое оборудование может работать в экономически неоптимальных режимах, поскольку его загрузка и режимы эксплуатации должны согласовываться с оптимизационными решениями на уровне всего производства с учетом указанных взаимосвязей и различных факторов влияния. Иными словами, оптимизация работ каждого рабочего центра может приводить к субоптимальным решениям, учитывающим совокупность ограничений, полученных с вышестоящего уровня оптимизации, охватывающего весь производственный цикл предприятия.

ODBC (Open DataBase Connectivity) – это программный интерфейс (API) доступа к базам данных (*открытая связь с базами данных*). Он позволяет единообразно оперировать с разными источниками данных, отвлекаясь от особенностей взаимодействия в каждом конкретном случае.

Анализ проектных решений комплексной автоматизации показывает, что предприятия тратят около 35...40 % своего бюджета, отводимого на поддержку информационных технологий, на работы по организации обмена данными между приложениями и СУБД. Столь высокий процент затрат объясняется несовместимостью форматов данных между унаследованными приложениями и стандартами применяемых СУБД «островной автоматизации». Вот почему необходимо использовать единый стандарт управления базами данных. В начале 1990 г. существовало несколько поставщиков баз данных, каждый из которых имел собственный интерфейс. Если приложению было необходимо общаться с несколькими источниками данных, для взаимодействия с каждой из баз данных было необходимо написать свой код. Для решения возникшей проблемы Microsoft и ряд других компаний создали стандартный интерфейс для получения и отправки данных источникам данных различных типов. С помощью ODBC прикладные программисты могут разрабатывать приложения для использования одного интерфейса доступа к данным, не беспокоясь о тонкостях взаимодействия с несколькими источниками.

Это достигается благодаря тому, что поставщики различных баз данных создают драйверы, реализующие конкретное наполнение стан-

данных функций из ODBC с учетом особенностей их продукта. Приложения используют эти функции, реализованные в соответствующем конкретному источнику данных драйвере, для унифицированного доступа к различным источникам данных. SQL – это язык структурированных запросов – универсальный компьютерный язык, применяемый для создания, модификации и управления данными в реляционных базах данных. Структурированный язык запросов основан на реляционной алгебре. Это язык манипулирования данными, который позволяет описывать условия поиска информации, не задавая для этого последовательность действий, нужных для получения ответа. SQL является стандартным средством доступа к серверу баз данных. Стандарт SQL содержит компоненты, как для определения, изменения, проверки, так и защиты данных.

Стандарт PROFINET (IEC 61158) предназначен для коммуникационной части систем промышленной автоматизации. Он обеспечивает доступ к устройствам полевого уровня (датчикам, машинным контроллерам, исполнительным устройствам) со всех уровней управления предприятием. Стандарт позволяет выполнять системно широкий обмен данными, поддерживает проектирование ИКСУ в масштабах предприятия и использует IT стандарты вплоть до полевого уровня. Он поддерживает практически все существующие сети полевого уровня (PROFIBUS, Ethernet, AS-I, CAN, LonWorks и др.). Все они могут быть интегрированы в PROFINET без модификации установленной аппаратуры.

PROFINET базируется на Industrial Ethernet и использует стандарт TCP/IP (транспортный протокол/Internet протокол) для выполнения операций настройки параметров, конфигурирования и диагностики. Обмен данными в реальном масштабе времени выполняется через стандартные каналы связи Ethernet параллельно со стандартными вариантами обмена данными в сети Ethernet.

Определившись с набором стандартов, которым должна удовлетворять ИКСУ, можно приступить к проектированию ее отдельных компонентов.

## 4. ОПИСАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА КАК ОБЪЕКТА АВТОМАТИЗИРОВАННОГО УПРАВЛЕНИЯ

Любое производство состоит из множества технологических операций, каждая из которых служит для решения общей задачи выпуска конкурентоспособной продукции. Даже если большинство технологических операций управляется автоматизированными системами типа ГАП, РТК, АСУ ТП, АСУП, этих «островков автоматизации» оказывается недостаточно для решения задач управления производством. Это связано с тем, что отдельные автоматизированные участки производства, обладающие собственной логикой работы и оперирующие собственным набором данных. Такое разделение информационного пространства производства продукции не позволяет эффективно использовать результаты «островков автоматизации» для управления производством в целом.

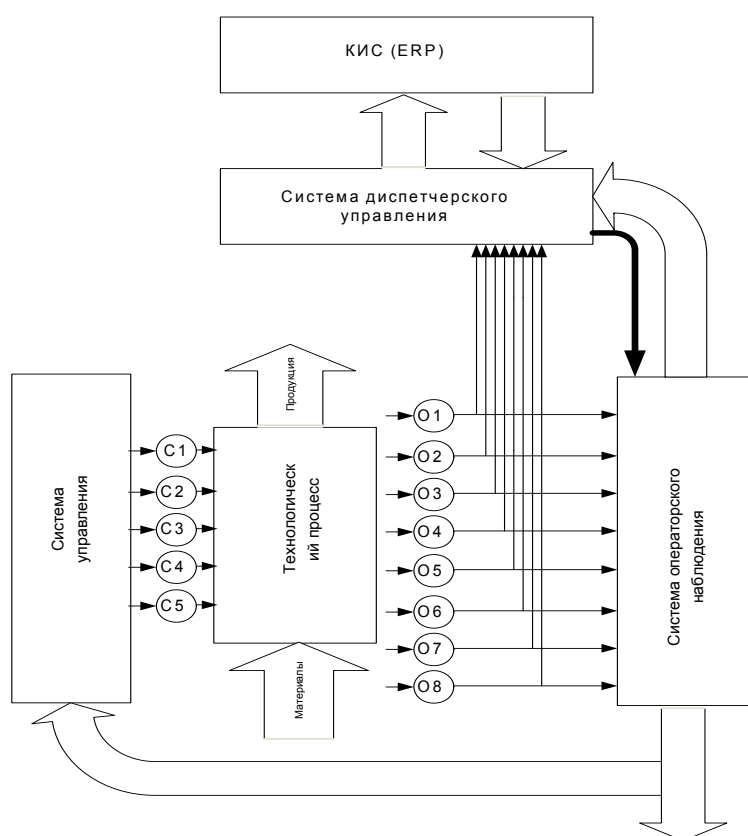


Рис. 9. Структурная схема ИКСУ

На рис. 9 показаны типовые каналы управления и наблюдения за технологическим процессом автоматизированного участка производства. Фактически каналы управления и наблюдения в реальных технологических модулях представляют собой их различную комбинацию.

По своему функциональному назначению в системе управления технологическим процессом можно выделить, по крайней мере, пять каналов управления, которые осуществляют разные по характеру воздействия на технологическую систему.

Первый канал управления С1 (рис. 9) связан с осуществлением в ГАП разнообразных дискретных операций: (например, включениявыключения приводов, зажима детали в патроне, фиксации поворота инструментального магазина, смены инструмента и т. д.). Число подобных операций в модуле может достигать нескольких сотен и управление ими по соответствующей программе на уровне С1 осуществляется от специального машинного контроллера (например, ПЛК FX фирмы Mitsubishi или S7 фирмы Siemens).

Канал С2 осуществляет управление движениями рабочих органов модуля (шпинделя, суппортов, шлифовальной бабки и др., обеспечивающими, например, заданную в программе траекторию режущей кромки инструмента относительно детали в рабочем пространстве). В зависимости от геометрии изделия на этом уровне посредством приводов могут осуществляться несколько формообразующих линейных и/или круговых перемещений рабочих органов (3...4 и более).

Третий канал воздействия на технологическую систему (С3) отвечает за автоматическую коррекцию формообразующих движений рабочего центра. На этом уровне по результатам измерения обработанной детали или предварительно измеренных перемещений рабочих органов вводятся дополнительные корректирующие воздействия с целью обеспечения заданной точности обработки (например, доворот гайки механизма привода подач стола резьбообрабатывающего станка от специального привода, коррекция геометрической программы обработки и т. д.).

С4 и С5 каналы управления применяются с целью обеспечения качества обработки. Канал С4 связан с активным контролем детали в процессе обработки. По результатам измерений отклонений размеров деталей вследствие износа инструмента, силовых и тепловых деформаций осуществляется подналадка (размерная поднастройка) РЦ. Подналадка осуществляется, например, посредством дополнительных воздействий приводом микроперемещений.

Канал С5 соответствует уровню адаптивного управления, осуществляемого по результатам измерения сил, моментов, деформаций и связанного с ними тока привода с целью изменения параметров процесса обработки (скорости резания, подачи, жесткости и др.).

Для формирования управлений (управляющих воздействий) могут использоваться специальные каналы наблюдения, подключаемые к модулям ввода данных в машинный контроллер (например, ПЛК FX фирмы Mitsubishi или S7 фирмы Siemens). Различают следующие уровни наблюдения.

Уровень О1 соответствует обнаружению событий об исполнении той или иной команды электроавтоматики модуля. Примером могут быть сигналы «норм/авар», «вкл/выкл». На этом уровне формируются осведомительные сигналы, поступающие в систему управления для выполнения следующей команды. Такие сигналы генерируются разнообразными концевыми выключателями, компараторами сигналов и кодов и т. д. Число подобных устройств на уровне О1 может быть достаточно велико.

Уровень О2 соответствует уровню измерения линейных и/или круговых перемещений рабочих органов модуля. Измерения перемещений и их производных (скоростей, ускорений) осуществляют измерительными преобразователями (ИП) различной физической природы: электромагнитной (индукционные ИП), оптико-электронной (кодовые, растровые, штриховые, интерференционные ИП) и др. Число ИП перемещений на уровне О2 соответствует количеству управляемых в модуле координат. В следящих приводах ИП включают в контуры обратных связей по перемещениям и их производным.

Уровень О3 соответствует диагностике состояния оборудования.

В формировании управляющих воздействий может участвовать и дополнительная измерительная информация, полученная вне технологического модуля, в частности, информация о параметрах детали до и/или после обработки, о состоянии самого модуля и его узлов и др. Возможные составляющие наблюдателя, связанные с получением информации вне модуля, могут быть названы как уставки вышестоящих уровней управления производством, в частности, системой диспетчерского управления.

Уровни О4–О6 контролируют состояние материального потока на входе технологического процесса, например, геометрические параметры заготовки (О4) и инструмента (О6). Уровни О7–О8 контролирует состояние энергетического процесса.

Число уровней наблюдения может существенно превышать число уровней управления. Чем более ответственный и качественный технологический процесс, тем больше уровней наблюдения требуется для управления процессом.

На начальном этапе проектирования ИКСУ необходимо выявить состав модулей машинного контроллера центра управления («островка автоматизации») и перечень его сигналов (информации), доступных для удаленной SCADA системы.

Обычно в качестве машинных контроллеров рабочих центров (ГАП, РТК, и др.) используются ПЛК FX фирмы Mitsubishi или S7 фирмы Siemens. Так машинные контроллеры FX2N представляют собой полнофункциональные ПЛК, включающие: процессор, источник питания, встроенные защищенные каналы дискретного ввода и каналы дискретного вывода. В зависимости от исполнения, количество каналов ввода-

вывода базовых модулей составляет от 16 до 128-ми с возможностью увеличения до 256-ти (за счет подключения модулей расширения).

Варианты исполнения базовых модулей:

- по питанию: 100–240 В АС 50/60 Гц (FX2N–“M”-ES), 24 В DC +/- 8 В (FX2N–“M”-DS);
- по выходам: дискретные транзисторные (FX2N–“MT”) или релейные (FX2N–“MR”).

Наличие широкой гаммы модулей расширения и коммуникационных модулей позволяет успешно использовать **FX2N** в самых различных задачах автоматизации, совмещая при этом низкую стоимость моноблочных контроллеров с гибкостью модульных систем.

В качестве модулей расширения контроллеров поставщиками предлагается широкий набор многоканальных модулей: дискретного ввода-вывода (DIO, DI, AI, DO); аналогово-цифровых и цифро-аналоговых преобразователей; преобразователей сигналов терморезисторов и термометров сопротивления; быстрого счета импульсов; одно- и двухосевых позиционирующих устройств; а также модулей контроля температуры, реализующих ПИД-регулирование.

Коммуникационные модули реализуют интерфейсы RS-232/RS-422/RS-485/Ethernet для подключения к различным периферийным устройствам, компьютерам и системным контроллерам.

Процедура монтажа базовых модулей и модулей расширения максимально проста. Для всех модулей предусмотрено крепление на DIN рейку или на вертикальную поверхность с помощью винтового крепления. Подключение контроллера к внешним устройствам осуществляется через клеммные панели с винтовым зажимом.

ПЛК серии **FX2N** оснащены процессорами RISC-архитектуры, что позволяет их успешно использовать в тех задачах автоматизации, где необходима надежная параллельная обработка нескольких алгоритмов со строго детерминированным временем реакции. Быстродействие используемых процессоров – 0,08 микросекунд на логическую инструкцию. Удобство программирования **FX2N** обеспечивается за счет использования готового программного обеспечения Mitsubishi Electric – MELSOFT, поддерживающего унифицированные языки программирования стандарта IEC 1131.3. Для повышения эффективности программирования сложных процессов в распоряжении пользователя находится набор из 125-ти готовых инструкций, таких, как: счетчики; таймеры; часы реального времени; ПИД-регулятор, с автоматической настройкой параметров. ПЛК данной серии имеют встроенный сопроцессор с арифметикой плавающей точки, тригонометрическими функциями и функцией квадратного корня. Питаемая от батареи внутренняя память может хранить до 8000 программных шагов с расширением до 16000. Контроллеры конфигурируются как ло-

кальные станции в сетях *MITSUBISHI* и как *slave*-станции в открытых сетях (*Profibus/DP*). С ними совместимы, контроллеры MELSEC серий FX1S/FX1N/FX2N, которые поддерживают объединение в многоточечную сеть, а также сеть с конфигурацией точка-точка.

*Программируемые контроллеры S7-300* включают в свой состав:

- модуль центрального процессора (CPU). В зависимости от степени сложности решаемых задач в программируемом контроллере могут использоваться различные типы центральных процессоров;
- сигнальные модули (SM), предназначенные для ввода и вывода дискретных и аналоговых сигналов;
- коммуникационные процессоры (CP) для организации обмена данными через Industrial Ethernet, PROFIBUS, AS-Interface и PtP интерфейс;
- функциональные модули (FM): интеллектуальные модули для решения задач скоростного счета, позиционирования, автоматического регулирования и других;
- интерфейсные модули (IM) для подключения стоек расширения к базовому блоку контроллера;
- блоки питания (PS) для питания контроллера от сети переменного или постоянного тока.

Центральные процессоры S7-300 представляются линейкой моделей различной вычислительной мощности: CPU 312/ CPU 314/ CPU 315-2DP/ CPU 317-2DP. Все CPU отличаются увеличенными объемами рабочей памяти и повышенным быстродействием, работают без буферной батареи, используют в качестве загружаемой памяти микрокарту памяти (MMC-3В NFlash) емкостью до 8 Мбайт, способны поддерживать большое количество активных коммуникационных соединений. Кроме того, MMC используется для сохранения данных при перебоях в питании CPU, хранения архива проекта, включая символную таблицу и комментарии, а также для архивирования промежуточных данных.

Отличительной чертой CPU S7-300 является наличие встроенных входов и выходов, а также набора встроенных в операционную систему технологических функций. Количество и вид встроенных входов и выходов зависит от типа конкретного центрального процессора. Все встроенные дискретные входы универсальны. Они могут использоваться для ввода входных дискретных сигналов или для выполнения встроенных функций. Часть дискретных выходов может работать в импульсном режиме.

Набор встроенных функций также зависит от типа конкретного CPU. В наиболее мощных CPU обеспечивается возможность использования всех дискретных входов в качестве входов аппаратных прерываний, поддерживаются функции скоростного счета, измерения частоты или длительности периода, ПИД-регулирования, позиционирования по одной оси, перевода части дискретных выходов в импульсный режим.

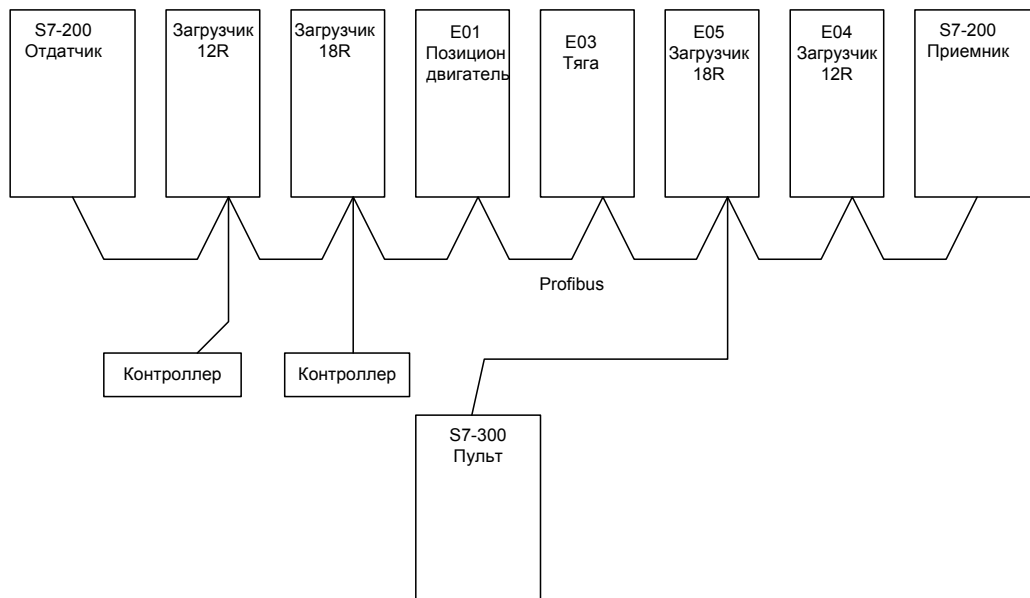


Рис. 10. Структурная схема соединения модулей управления рабочего центра

Коммуникационные модули реализуют интерфейсы RS-232/RS-422/RS-485/Ethernet для подключения к различным периферийным устройствам, компьютерам и системным контроллерам.

Система команд центральных процессоров включает в свой состав более 350 инструкций и позволяет выполнять:

- логические операции, операции сдвига, вращения, дополнения, операции сравнения, преобразования типов данных, операции с таймерами и счетчиками;
- арифметические операции с фиксированной и плавающей точкой, извлечение квадратного корня, логарифмические операции, тригонометрические функции, операции со скобками;
- операции загрузки, сохранения и перемещения данных, операции переходов, вызова блоков, и другие операции.

Для программирования и конфигурирования контроллеров SIMATIC S7-300 могут использоваться пакеты STEP 7 или STEP 7 Lite.

Пакет STEP 7 Lite может применяться для программирования и конфигурирования контроллеров S7-300. Схема взаимодействия модулей S7-300 показана на рис. 10.

Результатом разработки этого раздела проекта должно быть текстовое описание технологического процесса (ГАП) с привязкой его к чертежам технологических схем. В этом разделе необходимо указать описание параметров, точек их сбора/управления, единицы измерения, рабочий диапазон каждой физической величины.



## 5. ОПИСАНИЕ ПРОИЗВОДСТВЕННОГО ПРОЦЕССА КАК ОБЪЕКТА АВТОМАТИЗИРОВАННОГО УПРАВЛЕНИЯ

Описание производственного процесса в целом может быть представлено в виде карты (функциональных моделей) основных бизнес-процессов (БП). При описании отдельного процесса используется спецификация БП. При описании обычно строится функциональная модель «как есть» (as-is), которая характеризует положение дел на момент обследования. Затем эта модель уточняется до описания «как должно быть» (as-to-be). Функциональная модель бизнес-процессов представляет собой многоуровневую систему взаимосвязанных диаграмм, содержащую полное описание процессов жизненного цикла производства продукции, с выделением узлов действий, входов, выходов, управлений (условий) и требуемых механизмов (ресурсов). Каждый узел (обозначается прямоугольником) характеризует действие (процесс, работу, функцию, операцию по переработке информационных или материальных ресурсов) (рис. 11).

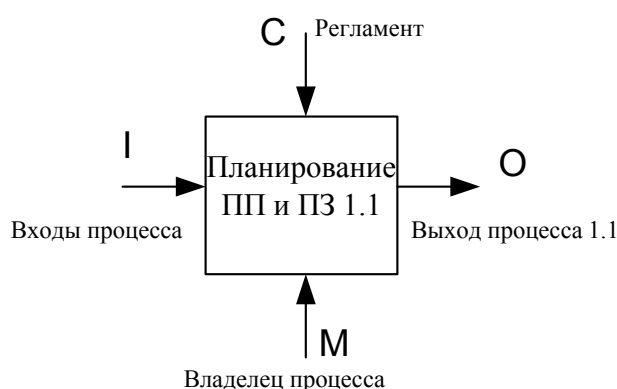


Рис. 11. IDEF0 узел функциональной модели

Вход I (Input) представляет собой то, что перерабатывается процессом, а выход O (output) результат переработки обозначаются стрелками слева и справа соответственно. Управлением C (control) служит информация, необходимая для выполнения процесса (стрелка сверху). Механизм M (Mechanism) обеспечивает выполнение (реализацию) процесса с использованием его оборудования, персонала и т. д. (стрелка снизу). Построение и вид функциональной модели регламентируется стандартом Р50.1.028-2001 [7]. Информационные технологии поддержки жизненного цикла изделия. Методология функционального моделирования,

а также ГОСТ Р ИСО 10303-203. Системы автоматизации производства и их интеграция.

Деятельность на предприятии обычно задается планами производства (составляемыми на уровне бизнес-систем логистики), которые затем спускаются на производство, где по ним составляются детальные графики, содержащие рабочие производственные задания, действия и события, возникающие при их выполнении [11, 14]. Часть информации, поступающей на следующий нижний уровень, определяется заданиями и требованиями по выполнению технологических процессов. Данные о состоянии оборудования и технологических процессов поступают в модуль контроля и анализа эффективности производства.

*Выбор состава прикладных функций ИКСУ.* Стандартами MES и S95 установлены 8 базовых бизнес-процесса (рис. 12).

Из перечня задач, которые должны решаться в рамках выполнения этих базовых бизнес-процессов могут быть выделены те, которые должны быть решены системой ИКСУ с использованием АРМ различного назначения.

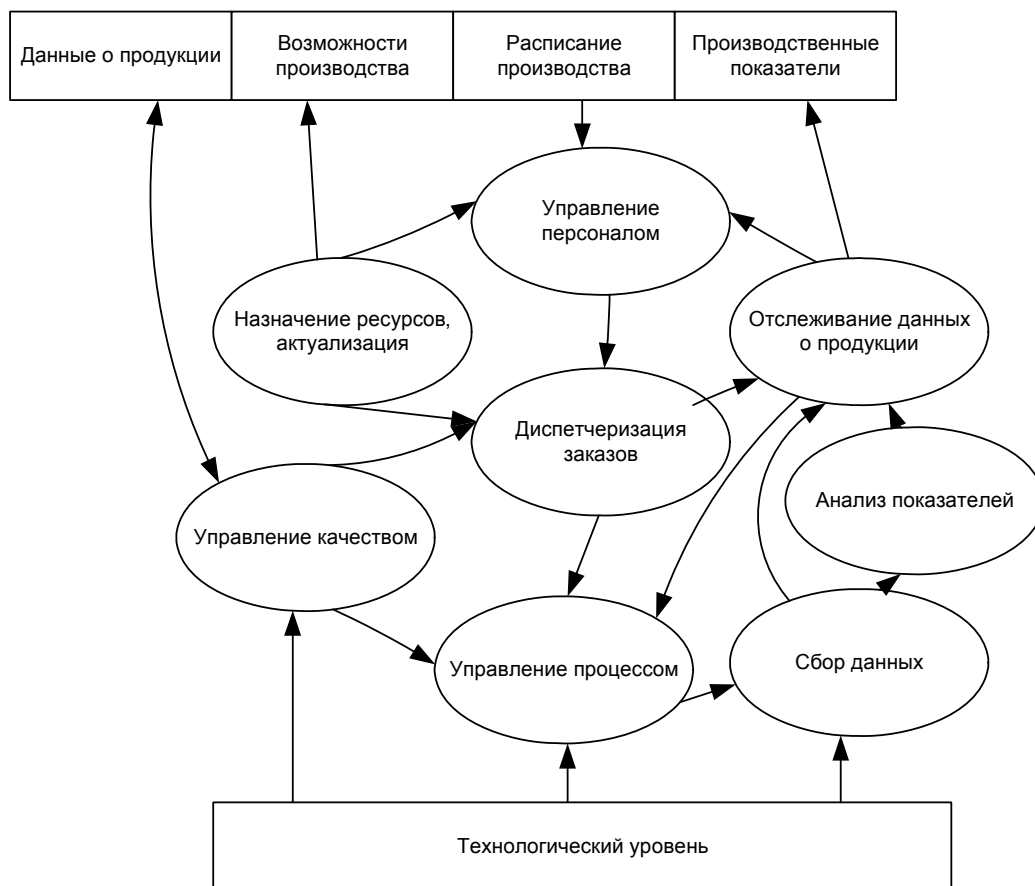


Рис. 12. Карта бизнес-процессов управления производством (стандарты MES, S95)

**APM SCADA мастера** в общем случае должен решать следующие задачи.

- Диагностирование состояния технологического оборудования.
- Управление оборудованием через средство экранных форм (управление посредством экранной формы основным и вспомогательным оборудованием в режимах пуска, нормальной эксплуатации, планового останова и в аварийных ситуациях).
- Подключение справочников технических условий производства.
- Подключение и визуализация заявок на производство продукции. Управление подготовкой линии под загрузку
- Контроль над процессом автоматического изготовления (оператор должен иметь возможность выдавать директивы типа «ПУСК РЦ», «ОСТАНОВ РЦ», а система при этом должна проверять корректность этих команд).
- Архивирование технологических и расчетных параметров, событий и действий операторов.
- Представление оперативной информации о выполнении сменных заданий.
- Контроль действий оперативного и обслуживающего персонала.
- Подготовку отчетов о фактическом использовании оборудования (первичная отчетность).

**APM SCADA диспетчеризации производства** должно решать следующие задачи.

- Отслеживание выполнения операций. Мониторинг выполнения технологических требований.
- Отслеживание выполнения заказов, объемов, партий. Просмотр протоколов нарушений.
- Контроль в реальном времени выполнения работ в соответствии с планом.
- Анализ производительности.
- Формирование и печать отчетной документации на основании данных, собираемых технологическим комплексом (сводный сменный отчет о работе завода (цеха, участка) с обобщенными данными о работе завода, цеха, участка за смену, о почасовой выработке продукции за смену, от начала декады, от начала месяца).
- Контроль состояния и распределения ресурсов.
- Отслеживание занятости оборудования.

**APM технолога** должно выполнять следующие функции.

1. Управление качеством продукции:

- представление данных измерений о качестве продукции, в том числе и в режиме реального времени, собранных с технологических линий;

- мониторинг информации о ходе технологического процесса (данные по качеству продукции, пуск/останов, допусковый контроль выхода значений за предупредительные и аварийные диапазоны;
  - отслеживание предупредительной и аварийной сигнализации;
  - оповещение оператора об аварийных, нештатных и штатных событиях, происходящих в системе – пуск/останов принудительно;
  - предложение действий по исправлению ситуации на основе анализа корреляционных зависимостей и статистических данных причинно-следственных связей контролируемых событий.
2. Контроль состояния и распределения ресурсов:
- отслеживание занятости оборудования. Отображение состояния технологического оборудования и всего комплекса аппаратных средств ПТК;
  - коррекция настроечных параметров задач (параметров настройки автоматических регуляторов, уставок аналоговых параметров и др.) в режиме реального времени.
3. Сбор и хранение данных:
- мониторинг справочников по ТУ и ТП. Ручной ввод информации.
4. Отслеживание истории продукта:
- представление информации о том, где и в каком порядке велась работа с данной продукцией (отчет о персонале, компоненты продукции, партия, серийный номер, текущие условия производства, несоответствия установленным нормам).

*АРМ диспетчера по обслуживанию оборудования* должно обеспечивать:

- отображение состояния технологического оборудования и всего комплекса аппаратных средств ТП. Отображение графика ремонтов. Формирование заданий на ремонт; Контроль в реальном времени выполнения ремонтных работ в соответствии с планом. Контроль испытаний оборудования после ремонта;
- отслеживание аварийных ситуаций в технологическом процессе. Формирование на ремонт;
- отслеживание наработки оборудования.

*АРМ менеджера/ руководителя* должно выполнять следующие функции:

- отслеживание графика изготовления продукции по каждому контракту;
- контроль номенклатуры и объемов полуфабрикатной продукции в незавершенном производстве;
- контроль планирования и отслеживание выполнения планов по производству;
- отслеживание решений оперативного планирования.

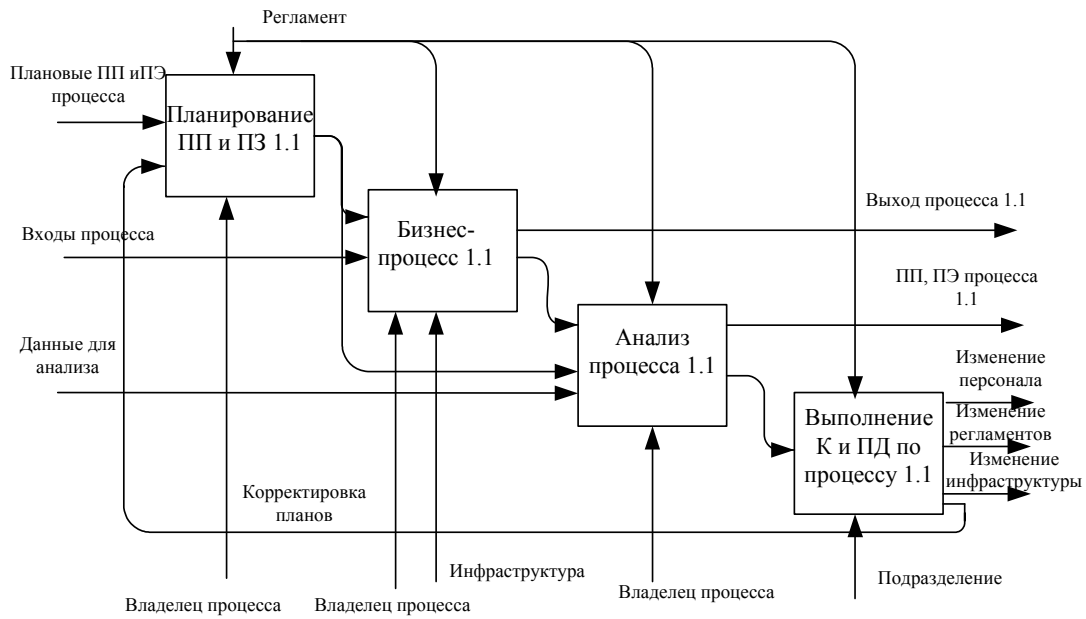


Рис. 13. IDEF 0 функциональная модель бизнес-процесса № 1.1

При проектировании этот раздел рекомендуется завершить разработкой IDEF0 диаграммы.

На модели необходимо конкретизировать название БП и добавить модель декомпозиции этого БП, исходя из ее функциональности (см. перечень решаемых задач).

## 6. РАЗРАБОТКА ПЕРЕЧНЯ (СПЕЦИФИКАЦИИ) ВХОДНЫХ И ВЫХОДНЫХ СИГНАЛОВ, ДОСТУПНЫХ ДЛЯ ИХ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ В ИКСУ (ТАБЛИЦЫ ВХОД–ВЫХОДНЫХ СИГНАЛОВ)

Согласно определению, приведенному в Единой системе конструкторской документации (ЕСКД), спецификация – документ, определяющий состав сборочной единицы, комплекса, комплекта. В спецификации содержится подробное перечисление узлов и деталей какого-либо изделия, конструкции, установки, и т. п., входящих в состав сборочного или монтажного чертежа. Для ИКСУ важным является перечисление преобразователей (ПИП, ВИП) каналов сбора данных и управления технологическим оборудованием.

*Перечень входных/выходных сигналов АСУ ТП*, а также перечень информации, доступной на уровне управления производственным процессом, следует свести в отдельные таблицы. Этот перечень необходим, прежде всего, для расчетов числа вход-выходных каналов SCADA системы. Такие расчеты определяют объемы лицензионных соглашений при приобретении ППП SCADA.

Рекомендуется все вход-выходные сигналы АСУ ТП свести в таблицу, пример которой (табл. 1) приведен ниже. Все эти данные можно получить либо путем технологического аудита, либо из сопроводительной документации на рабочие центры.

Таблица 1

*Перечень входных/выходных сигналов*

Объект	Наименование параметра	Кол-во	Первичный преобразователь	Частота опроса	Диапазон изменения
Воло- очильный стан LSA – 450/13 (Щит № 1.1 с Ethernet- Switch)	Линия ВКЛ/ВЫКЛ	1	DO	событие	0/110 В
	Реле авар_стопа	1	DO	событие	0/110 В
	Сигнал сброса (Reset)	1	reset		0/20 В
	Счетчик импульсов энкодера		Counter	0,4...100 s	Разреш. (0,04...10 m) Число (0...216)

Окончание табл. 1

Объект	Наименование параметра	Кол-во	Первичный преобразователь	Частота опроса	Диапазон изменения
Воло- чийный стан TFS-8T (SIKORA) S7-300 (Щит с Ethernet № 4)	Линия ВКЛ	1	Линейный детектор	событие	0/220 В
	Реле авар стопа	1	Реле Авар общ.	событие	0/110 В
	Событие (Счетчик)		Счетчик	событие	0/1
	Строка подтверждения №№ катушек	1	Ключ ПО	событие	0/1
	Метраж (текущ)	1	АО	задание	Разреш. 0,04... 10 m
	Метраж (общ) (до 100 км)	1	Датчик длины	задание	Разреш 0,04... 10 m
	Скорость (текущ)		АО	0,4...100 s	Число (0...216)
	Диаметр	1	АО	0,4...100 s	Число (0...216)
	Отклонение параметра измерения (дейст/норм)		Контр расчет	задание	Число (0...216)
	Средн. матем (овальн/диаметр)		Контр расчет	задание	Число (0...216)
	Стат макс/мин (овальн/диамет)		Контр расчет	задание	Число (0...216)
	Размах		Контр расчет	задание	Число (0...216)
	Выход за предел допуска (овал/диаметр)		Контр расчет	задание	Число (0...216)
	Номер периода (время)				

В табл. 1 в колонке [Первичный преобразователь] рекомендуется указывать тип датчика (например, датчик длины, перемещения, скорости и т. п.) или тип сигнала датчика – например, дискретный, аналоговый, цифровой (DO, АО, DO). В колонке [Диапазон измерения] следует доопределить эти сигналы минимальным и максимальным значением, например, 0/1, 0/220 В – для дискретного сигнала, 4...20 мА – для аналогового, 0–2<sup>16</sup> – для 16-разрядного цифрового сигнала.

Представление *спецификации АСУ ПП* базируется на следующих принципах:

- функциональность процесса должна быть отделена от задач и особенностей его реализации;
- спецификация должна включать в себя особенности производственного процесса, устанавливаемых заданием на КП;
- спецификация должна быть легко читаемой и понятной для всех ее пользователей;
- спецификация должна быть терпимой к неполноте и возможности ее дополнения.

Спецификация бизнес-процесса должна включать в себя:

- общие сведения и ответственность руководителей процессов;
- функции процессов;
- результаты процессов и их потребители;
- внешние поставщики и входы процесса;
- согласование требований с поставщиками процессов;
- виды деятельности в рамках процесса, управление и требуемые ресурсы;
- цели процесса и показатели их достижения;
- мероприятия по улучшению процесса.

Пример спецификаций для процесса «Диагностирование РЦ 1.5.3» приведен в табл. 2 спецификаций.

Таблица 2

*Спецификации БП*

	Содержание	Характеристика
1	Наименование процесса	Диагностирование РЦ «Экструзионная установка»
2	Индекс (№ БП)	1.5.3
3	Назначение	Определение состояния РЦ
4	Результаты	Сообщение на экране АРМ «Допустимое, предаварийное, аварийное»
5	Владелец	Начальник цеха по ремонту
6	Участники	1.Инженер по ремонту 2.Менеджер по качеству
7	Предшествующий процесс(ы) (№ БП)	(1.5.2.) Мониторинг состояния
8	Следующий процесс (ы)	(1.5.4.)Планирование ремонта
9	Средства реализации	1.Производственное оборудование. 2.ПО SCADA
10	Вход	Сигналы датчиков контроля состояния



Окончание табл. 2

	Содержание	Характеристика
11	Выход	Сообщение на экране АРМ
12	Регламентирующие документы	Рабочая документация на РЦ
13	Критерии оценки БП	Критерии оценки состояния по ГОСТ Р 50779
14	Записи в ходе процесса	Тенды сигналов измерения
15	Применяемые внутренние регламенты	ДП «Ремонт технологического оборудования»

Такие спецификации позволяют формализовать описание бизнес-процесса. В приведенной таблице содержится вся необходимая информация для представления модели БП как для IDEF0, так и для EPC, UML нотаций.

## 7. ВЫБОР ПРОГРАММНЫХ СРЕДСТВ АСУ, ПОДДЕРЖИВАЮЩИХ ПРОФИЛЬ АРХИТЕКТУРЫ ИКСУ

Вопрос о том, какие покупные программно-технические средства следует использовать для системной интеграции приложений, является центральным при проектировании таких систем [11]. По оценке специалистов за счет рационального использования средств интеграции можно сократить расходы предприятия на создание и эксплуатацию прикладного программного обеспечения уровня предприятия примерно на одну треть. Под компонентами (средствами) системной интеграции понимается комбинация процессов, программных средств, стандартов и аппаратуры, благодаря которой обеспечивается «бесшовная» интеграция приложений в пределах одной или нескольких уровней предприятия, позволяющая им функционировать как единой системе. Средства системной интеграции, как правило, рассматриваются применительно к автоматизации предприятия в целом.

1. В соответствии с рекомендованным для ИКСУ профилем (*S-88*) для решения задач проектирования *АСУ batch-процессами* на рынке предлагаются, в частности, фирмами Rockwell Software и Siemens, специальные программные средства проектирования, например, RSBizWare™ Batch, Simatic Batch и PCS 7 (2008 г.).

Они позволяют:

- разрабатывать эффективные системы управления групповой обработки продукции, обеспечивая производственную гибкость, независимость технологических условий (рецептуры) от оборудования, реализацию независимого от партий координационного управления и организованный методологический подход к управлению;
- создавать рецепты и управлять ими, а также автоматически выполнять их;
- снизить затраты времени на проверку и ввод в эксплуатацию;
- конфигурировать физические и процедурные модели;
- интегрироваться с широким спектром дополнительных программных приложений;
- собирать подробные данные в электронном виде о процессе групповой обработки для подготовки подробных отчетов;
- интегрироваться и обмениваться информацией о партиях и рецептах с корпоративными информационными системами;
- моделировать весь технологический процесс групповой обработки.

В состав, в частности, RSBizWare Batch, входят шесть приложений, а именно:

- редактор Batch Equipment Editor, который позволяет графически описывать реальное оборудование;
- редактор Batch Recipe Editor, который позволяет графически описывать процедуры, необходимые для создания главных рецептов (ТУ);
- оболочка Batch View, которая представляет собой интерфейс оператора, взаимодействующий с сервером Batch Server;
- сервер Batch Server, который выполняет рецепты и координирует коммуникации между компонентами системы управления;
- среда моделирования Batch Simulator, которая позволяет моделировать и проверять рецепты (ТУ) применительно к конкретному оборудованию без связи с физическим процессом;
- архиватор Batch Archiver (по выбору), который передает электронные данные по процессу групповой обработки в любую SQL совместимую базу данных.

Таким образом, RSBizWare Batch:

- поддерживает модульность систем автоматизации процессов обработки партий продукции в соответствии со стандартом S88.01, принятым Обществом контрольно-измерительных приборов, систем и автоматизации (Instrumentation, Systems, and Automation Society – ISA).
- создает физическую модель при помощи графического интерфейса редактора Equipment Editor;
- создает рецепты и иерархию процедурной модели при помощи редактора Batch Recipe Editor;
- управляет партиями и отслеживает технологический процесс при помощи Batch View;
- собирает и размещает производственную информацию в журнале связанных с партиями событий Batch Event Journal;
- тестирует рецепты (ТУ) для различных производственных конфигураций при помощи Batch Simulator.

В соответствии с методологией, изложенной в стандарте S-88, программное обеспечение этого типа позволяет стандартизировать используемые технологические процедуры и ускоряет разработку и внедрение процессов групповой обработки и продукции.

2. В соответствии с рекомендованным для ИКСУ профилем для решения задач проектирования ISA-95, MES на рынке предлагаются, в частности, фирмами SIEMENS A&D и Wonderware, соответственно SIMATIC IT и MES Plant Intelligence (Factelligence). MES-система Wonderware Factelligence на сегодня является наиболее востребованной

системой управления производством на российском рынке. С помощью Wonderware Factelligence на предприятии организуется прослеживаемость материальных потоков, ведется партионный учет и электронный документооборот, визуализируются технологические маршруты, реализуется управление качеством продукции, анализируется работа оборудования и персонала, что обеспечивает прозрачность и управляемость производственного процесса.

MES-система Wonderware Factelligence может быть внедрена на предприятии и как отдельная информационная система, и как часть существующей IT-инфраструктуры. Мощные механизмы интеграции позволяют объединить Wonderware Factelligence с одной стороны с системами базовой автоматизации (АСУ ТП), а с другой стороны – с системами управления ресурсами предприятия (ERP), а также с системами ведения конструкторской документации (CAD).

SIMATIC IT – это продукт для построения MES-систем от SIEMENS, позволяющий выполнять комплексное моделирование производственных процессов, точно определять их возможности и получать данные с ERP уровня и уровня производства в масштабе реального времени. Это позволяет выполнять более эффективное управление производством и повышать его гибкость. Применение SIMATIC IT обеспечивает возможность получения целого ряда преимуществ:

- моделированию могут быть подвергнуты даже сложные деловые процессы и структуры производства, которые впоследствии могут быть объединены наиболее эффективным способом;
- процессы моделирования остаются полностью прозрачными и понятными и, самое главное, независимыми от функционирования реальных систем управления;
- моделирование может выполняться в любой точке предприятия: все процессы могут быть стандартизованы и наиболее удачные методы управления могут использоваться в масштабах всего предприятия.

SIMATIC IT обеспечивает плавный переход от результатов моделирования к выполнению принятых решений и управлению новыми приложениями MES. Это снижает время выполнения проектных работ, предотвращает возможность возникновения ошибок, позволяет документировать все шаги и обеспечивает защиту имеющихся ноу-хау. Таким образом, SIMATIC IT обеспечивает снижение затрат на построение MES уровня и защиту сделанных инвестиций.

Российский вариант подобной системы – это программный пакет Фобос, который решает задачи оперативного управления производством дискретного типа, преимущественно позаказного, мелкосерийного или даже единичного.

3. В соответствии с рекомендованным для ИКСУ профилем для решения задач проектирования SCADA систем на рынке предлагаются большое число программных пакетов: Trace Mode, Genesys, Infinity Suite (Lite). В частности, в качестве InfinitySuite 1.0 ООО «ЭлеСи» (г. Томск) предлагается инструментальный пакет, ориентированный на разработку SCADA и MES решений для крупных предприятий с непрерывным циклом производства.

Infinity Suite обеспечивает:

- сбор, обработку, хранение производственных и технологических данных;
- объединение производственных и технологических данных в единое информационное пространство;
- оперативное планирование, распределение и контроль состояния ресурсов в режиме реального времени;
- диспетчеризацию производственных и технологических процессов;
- формирование отчетности, сводок, балансов.

Infinity Suite включает в себя InfinitySCADA – средство для создания автоматизированных систем управления технологическими процессами и InfinityFactory – средство для создания автоматизированных систем управления производственными процессами.

4. Вариантов технической реализации и конкретных средств PLM, предлагаемых различными производителями в рамках системной интеграции, достаточно много. Однако в целом облик программно-технической структуры системной интеграции практически приближается к некоторой унифицированной форме в виде продуктов ведущих мировых системных интеграторов для промышленных предприятий: PLM (Dassault Systems), PI System (OSI Software), Total Plant Solution (Honeywell), FactorySuite (Wonderware), Enterprise Technology Solution (Yokogawa), Mizushima Plant (Mitsubishi Chemical Co), Plant Information Management System (JGC Corporation)).

Одним из широко распространенных программных пакетов PLM-решений является пакет, базирующийся на программных продуктах фирмы Dassault Systemes. Пакет включает систему 3D проектирования CATIA, подсистемы ENOVIA SmarTeam и DELMIA, реализующие технологию коллективного управления данными PDM (Product Data Management).

Проектирование в системе CATIA V5 основано на применении стандартизированного формата данных и инструментов. В процессе проектирования создается многопараметрическая управляемая база данных 3D модели-шаблона. В нее входят все геометрические параметры, теоретические расчеты, рекомендации, стандарты, базы данных деталей и комплектующих и т. д.

Подсистема ENOVIA SmarTeam предназначена для управления и обмена информацией о производимых на предприятии продуктах в течение всего их жизненного цикла. Этот набор решений имеет общую архитектуру и возможности. Инженеры могут использовать ENOVIA SmarTeam для управления данными САПР и их изменениями. Специалисты по маркетингу могут использовать его для получения доступа к чертежам и спецификациям, для оформления новых предложений, снабженцы – для доступа к информации о материалах и покупных изделиях. Специалисты по производству могут просматривать конструкторские решения и использовать ENOVIA SmarTeam для управления оснасткой, для передачи спецификаций и прочих данных в ERP, а также для координации конструкторских и производственных процессов. Многие сотрудники в организации могут использовать ENOVIA SmarTeam для поиска и управления любыми типами относящейся к продукту информации в рамках своих бизнес-процессов. ENOVIA SmarTeam позволяет в реальном масштабе времени задать способ механической обработки и определить необходимый набор инструментов.

Пакет DELMIA PLM for Manufacturing содержит богатый набор инструментов для цифрового описания, прогнозирования и моделирования производственных процессов изготовления изделий и необходимых для этого ресурсов. По сути, DELMIA – это цифровая виртуальная фабрика, позволяющая исследовать и оптимизировать процессы изготовления и обслуживания изделий до начала их реального производства в металле. Будучи объединенной с системой CATIA, DELMIA позволяет моделировать процессы изготовления изделия параллельно с его проектированием, оперативно учитывая возникающие конструктивные изменения, множественность версий и исполнений изделия, ограничения, налагаемые оборудованием и человеческим фактором. Это позволяет существенно сокращать сроки разработки и запуска в производство новых изделий, а также повышать их качество и технологичность. Программы этой группы позволяют специалистам, непосредственно связанным с созданием изделия, использовать всю полноту информации об изделии, процессах и ресурсах для решения текущих задач на своих рабочих местах и получения результатов в простом и наглядном виде. В частности, имеются средства для создания рабочих инструкций в 3D-виде, визуализации различных процессов, поиска нужной совокупности данных, интеграции с другими приложениями (ERP, MES и др.).

## 8. РАЗРАБОТКА СТРУКТУРНОЙ СХЕМЫ ИКСУ

Структурные схемы ИКСУ, описывают основные функциональные части управления производственным и технологическим процессами. Эти схемы разрабатываются при проектировании на стадиях, предшествующих разработке схем других типов, и ими пользуются для понимания проектных решений и (или) требований всеми участниками проекта. Структурные схемы ИКСУ могут нести различную смысловую нагрузку: описывать взаимодействие служб управления (рис. 17), описывать структуру межмодульных связей, например, в ПЛК машинного контроллера (рис. 10).

Графическое построение схемы должно давать наиболее наглядное представление о последовательности взаимодействия функциональных частей в изделии.

На линиях взаимосвязей рекомендуется стрелками обозначать направление хода процессов, происходящих в изделии.

На схеме должны быть указаны наименования каждой функциональной части изделия, если для ее обозначения применен прямоугольник.

На схеме допускается указывать тип элемента (устройства) и(или) обозначение документа (основной конструкторский документ, государственный стандарт, технические условия), на основании которого этот элемент (устройство) применен.

При изображении функциональных частей в виде прямоугольников наименования, типы и обозначения рекомендуется вписывать внутрь прямоугольников.

При большом количестве функциональных частей допускается взамен наименований, типов и обозначений проставлять порядковые номера справа от изображения или над ним, как правило, сверху вниз в направлении слева направо. В этом случае наименования, типы и обозначения указывают в таблице, помещаемой на поле схемы.

Допускается помещать на схеме поясняющие надписи, диаграммы или таблицы, определяющие последовательность процессов во времени, а также указывать параметры в характерных точках (величины токов, напряжений, формы и величины импульсов, математические зависимости и т. п.).

При проектировании ИКСУ должны быть разработаны следующие структурные схемы:

- схему конфигурации ГАП, показанную выше на рис. 2;
- схему взаимодействия подсистем (АРМ) ИКСУ (рис. 5)

- схему ИКСУ (рис. 6);
- схему взаимодействия диспетчерского и обслуживающего персонала в ИКСУ (рис. 16);
- схему ЛВС ИКСУ (рис. 17);
- функциональную схему автоматизации, показанную в разделе 9 (рис. 20);
- схему информационных потоков, показанную в разделе 15 (рис. 36);
- схемы автоматизации разрабатывают в целом на технологическую (инженерную) систему или ее часть – технологическую линию, блок оборудования, установку или агрегат.

На схеме (рис. 5) приведена структура взаимодействия двух подсистем ИКСУ – АСУ ТП и АСУ ПП. Их взаимодействие осуществляется через БД обмена этих подсистем. АРМ(ы) диспетчеров используют как информацию технологического (оперативного) назначения, так и справочные данные (плановые задания, логистические указания) баз данных предприятия.

На структурной схеме ИКСУ (рис. 6) показана структура компьютерного оборудования, осуществляющего сбор и передачу данных на уровень серверов ИКСУ. На нижнем уровне осуществляется сбор сигналов (информации). Системный контроллер (контроллер сбора данных) осуществляет преобразование сигналов в информационный поток данных, который по каналам коммуникации поступает на уровень диспетчерского управления.

Схема информационных потоков – графический способ описания процессов движения и преобразования *информации* в системе *управления*. Схему автоматизации допускается совмещать со схемой соединений (монтажной), выполняемой в составе основного комплекта по ГОСТ 21.401, или со схемами инженерных систем. Допускается ее выполнять в виде функциональной схемы автоматизации.

На функциональной схеме автоматизации изображают:

- технологическое и инженерное оборудование и коммуникации (трубопроводы, газоходы, воздухопроводы) автоматизируемого объекта (далее – технологическое оборудование);
- технические средства автоматизации или контуры контроля, регулирования и управления (совокупность отдельных функционально связанных приборов, выполняющих определенную задачу по контролю, регулированию, сигнализации, управлению);
- линии связи между отдельными техническими средствами автоматизации или контурами (при необходимости).

Технологическое оборудование на схемах автоматизации рекомендуется изображать в соответствии со схемой соединений, принятой



в основном комплекте или схемами инженерных систем. При этом допускается упрощать изображения технологического оборудования, не показывая на схеме оборудование, коммуникации и их элементы, которые не оснащаются техническими средствами автоматизации и не влияют на работу систем автоматизации.

При отсутствии в основном комплекте схемы соединений технологическое оборудование изображают с учетом требований следующих стандартов:

- оборудование – по ГОСТ 2.780, ГОСТ 2.782, ГОСТ 2.788, ГОСТ 2.789, ГОСТ 2.790, ГОСТ 2.791, ГОСТ 2.792, ГОСТ 2.793, ГОСТ 2.794, ГОСТ 2.795;
- коммуникации в зависимости от транспортируемых сред – в соответствии с приложением 3 ГОСТ 14202;
- трубопроводную запорную арматуру, используемую в системах автоматизации (не регулирующую) – по ГОСТ 2.785.

Условные графические и буквенные обозначения приборов и контуров контроля и управления принимают по ГОСТ 21.404. Буквенные обозначения измеряемых величин и функциональных признаков приборов указывают в верхней части окружности (овала).

Линии связи между приборами и контурами контроля и управления изображают на схемах сплошной тонкой линией независимо от вида сигналов и количества проводов и труб.

Приборы, встраиваемые в технологические коммуникации, показывают в разрыве линий изображения коммуникаций в соответствии с рис. 14, устанавливаемые на технологическом оборудовании (с помощью закладных устройств) показывают рядом – в соответствии с рис. 15.



Рис. 14

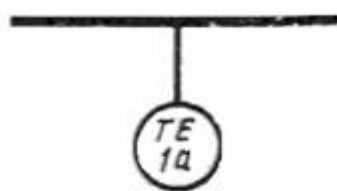


Рис. 15

Заголовки, предназначенные для изображения щитов и пультов, принимают в соответствии с наименованиями, принятыми в эскизных чертежах общих видов, для комплексов технических средств – в соответствии с их записью в спецификации оборудования.

На схеме автоматизации буквенно-цифровые обозначения приборов указывают в нижней части окружности (овала) или с правой стороны от него, обозначения электроаппаратов – справа от их условного графического обозначения. При этом обозначения технических средств

присваивают по спецификации оборудования и составляют из цифрового обозначения соответствующего контура и буквенного обозначения (прописными буквами русского алфавита) каждого элемента, входящего в контур (в зависимости от последовательности прохождения сигнала).

При большом количестве приборов допускается применять обозначения, в которых первый знак соответствует условному обозначению измеряемой величины, последующие знаки – порядковому номеру контура в пределах измеряемой величины.

Электроаппараты, входящие в систему автоматизации (звонки, сирены, сигнальные лампы, табло, электродвигатели и др.) показывают на схеме графическими условными обозначениями по ГОСТ 2.722, ГОСТ 2.732, ГОСТ 2.741 и присваивают им буквенно-цифровые обозначения по ГОСТ 2.710.

Линии связи допускается изображать с разрывом при большой протяженности и/или при сложном их расположении. Места разрывов линий связи нумеруют арабскими цифрами в порядке их расположения в прямоугольнике с заголовком «Приборы местные».

Допускается пересечение линий связи с изображениями технологического оборудования. Пересечение линий связи с обозначениями приборов не допускается.

На линиях связи указывают предельные (максимальные или минимальные) рабочие значения измеряемых (регулируемых) величин по ГОСТ 8.417 или в единицах шкалы выбираемого прибора. Для обозначения разрежения (вакуума) ставят «минус». Для приборов, встраиваемых непосредственно в технологическое оборудование и не имеющих линий связи с другими приборами, предельные значения величин указывают рядом с обозначением приборов.

Технологическое оборудование допускается не изображать на схеме в случаях, когда точки контроля и управления в технологических цехах немногочисленны (например, в рабочей документации по диспетчеризации). В этом случае в верхней части схемы вместо изображения технологического оборудования приводят таблицу, в графах которой указывают наименование оборудования и коммуникаций.

**Структурная схема ЛВС.** Проектируемая ЛВС должна обслуживать задачи производственного и технологического управлений. Для снижения потенциальных рисков, связанных с открытостью информационного пространства ЛВС технологического управления, во многих отраслевых нормативных документах устанавливаются требования о выделении технологической сети в независимую подсеть, не связанную общим трафиком с КИС. При выделении технологической сети ИКСУ из общего информационного пространства КИС следует учитывать

необходимость использования информации КИС на АРМ диспетчеров АСУ ТП. Поэтому возможными решениями могут быть либо использование двух Ethernet-адаптеров, разделяющих на сервере ЛВС предприятия на две подсети, (один адаптер должен «смотреть» в сторону КИС, другой в сторону технологической сети), либо применение виртуальной технологии (VLAN) выделения подсетей различного назначения.

С появлением технологии коммутируемого VLAN Ethernet стало возможным логическое сегментирование сети на множество выделяемых широковещательных доменов, что позволяет улучшить производительность сети, уменьшить широковещательный трафик в каждом из сегментов, улучшить их администрирование (и, в частности, повысить безопасность технологического сегмента технологической ЛВС).

Технология VLAN делит общий домен широковещания ЛВС предприятия на меньшие домены широковещания, ограничивая широковещательный трафик в пределах одной группы пользователей. При применении VLAN возможны следующие варианты:

- построение порт – ориентированной VLAN;
- построение VLAN с маркированными кадрами (IEEE 802.1Q);
- построение VLAN на основе протоколов высокого уровня.

На рис. 16 показан пример реализации порта ориентированной VLAN.

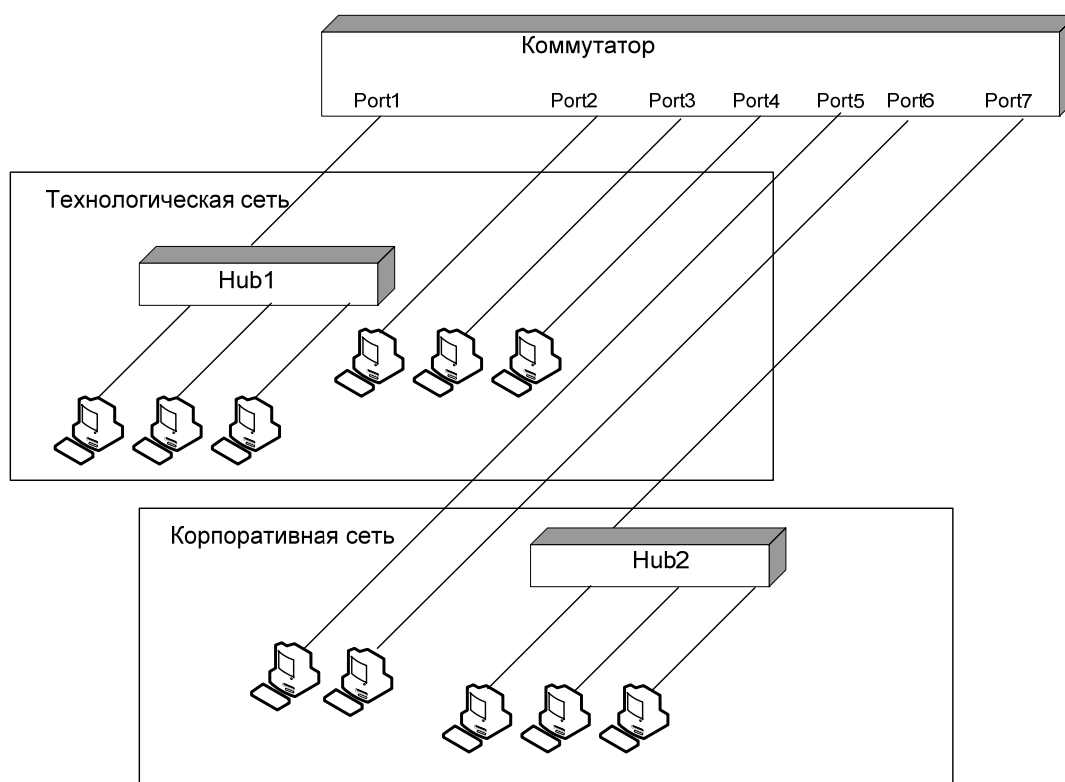


Рис. 16. ЛВС порт ориентированной VLAN

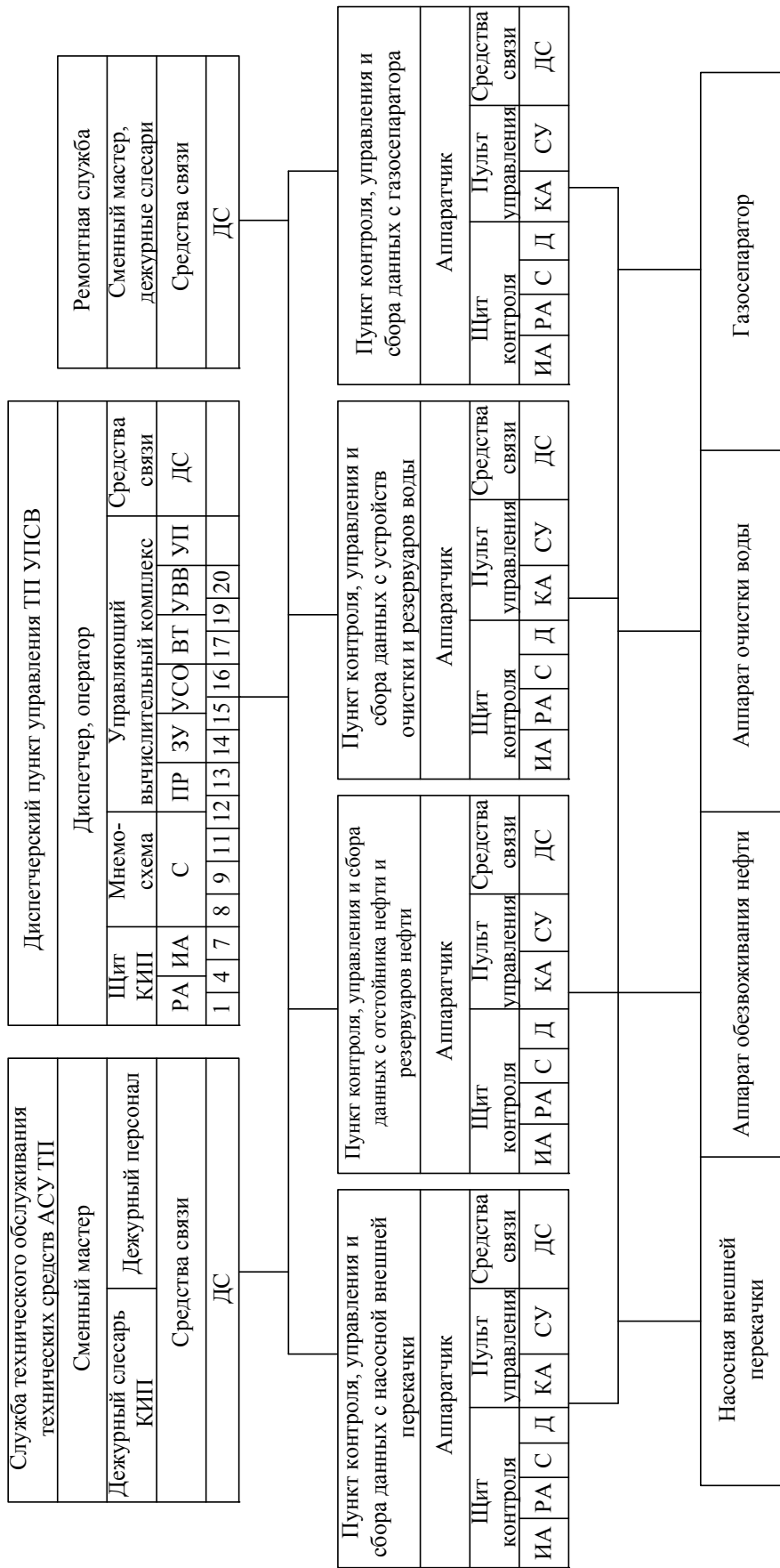


Рис. 17. Схема взаимодействия диспетчерского и обслуживающего персонала в ИКСУ

В этом примере два концентратора (Hub1 и Hub2), к которым подключены соответственно приложения АСУ ТП и корпоративные бизнес приложения, выделяются в отдельные сети за счет их подключения к портам коммутатора, специально настроенных для обслуживания выделенных сетей.

Схема взаимодействия диспетчерского и обслуживающего персонала в ИКСУ показана на рис. 17 [1].

На структурной схеме показаны:

- технологические подразделения автоматизируемого объекта;
- пункты контроля и управления (местные щиты, операторские и диспетчерские пункты);
- технологический (эксплуатационный) персонал и специализированные службы, обеспечивающие оперативное управление и нормальное функционирование технологического объекта;
- основные функции и технические средства (устройства), обеспечивающие их реализацию в каждом пункте контроля и управления;
- взаимосвязь подразделений технологического объекта, пунктов контроля и управления и технологического персонала между собой и с вышестоящей системой управления.

## 9. РАЗРАБОТКА ФУНКЦИОНАЛЬНОЙ СХЕМЫ АВТОМАТИЗАЦИИ

Функциональная схема автоматического (автоматизированного) контроля и управления предназначена для отображения основных технических решений, принимаемых при проектировании систем автоматизации технологических процессов. На функциональной схеме изображаются системы автоматического контроля, регулирования, дистанционного управления, сигнализации, защиты и блокировок. Функциональная схема автоматического контроля и управления содержит упрощенное изображение технологической схемы автоматизируемого процесса. Все элементы систем управления показываются в виде условных изображений и объединяются в единую систему линиями функциональной связи.

В соответствии с ГОСТ 2.702–75 (2000) [1] на функциональной схеме изображают функциональные части изделия (элементы, устройства и функциональные группы), участвующие в процессе, иллюстрируемой схемой, и связи между этими частями.

Функциональные части и связи между ними на схеме изображают в виде условных графических обозначений, установленных в стандартах Единой системы конструкторской документации. Отдельные функциональные части допускается изображать в виде прямоугольников.

На схеме должны быть указаны:

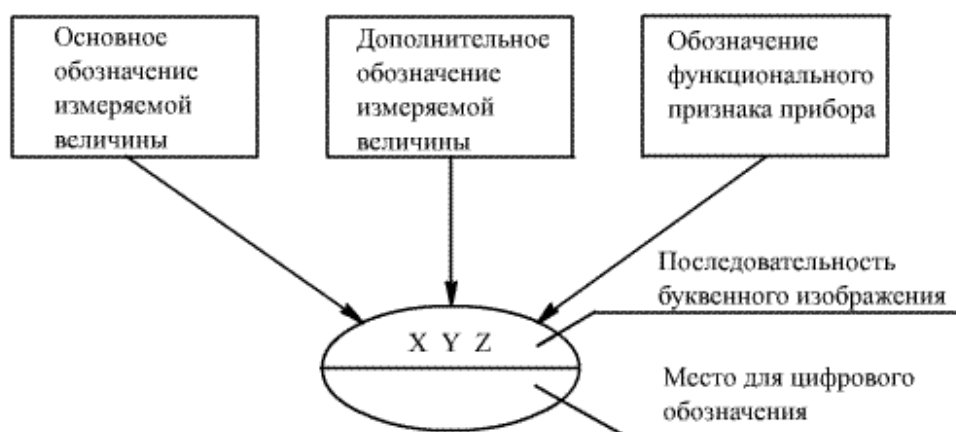
- для каждой функциональной группы – обозначение, присвоенное ей на принципиальной схеме, и(или) ее наименование; если функциональная группа изображена в виде условного графического обозначения, то ее наименование не указывают;
- для каждого устройства, изображенного в виде прямоугольника, – позиционное обозначение, присвоенное ему на принципиальной схеме, его наименование и тип и (или) обозначение документа (основной конструкторский документ, государственный стандарт, технические условия), на основании которого это устройство применено;
- для каждого устройства, изображенного в виде условного графического обозначения, – позиционное обозначение, присвоенное ему на принципиальной схеме, его тип и(или) обозначение документа;
- для каждого элемента – позиционное обозначение, присвоенное ему на принципиальной схеме, и(или) его тип.

На схеме рекомендуется указывать технические характеристики функциональных частей (рядом с графическими обозначениями или на свободном поле схемы).

На схеме помещают поясняющие надписи, диаграммы или таблицы, определяющие последовательность процессов во времени, а также указывают параметры в характерных точках (величины токов, напряжений, формы и величины импульсов, математические зависимости и т. д.).

В соответствии с ГОСТ 36-27-77 «Приборы и средства автоматизации. Обозначения условные в схемах автоматизации технологических процессов» устанавливаются обозначения измеряемых величин, функциональные признаки приборов, линии связи, а также способы и методика построения условных графических обозначений приборов и средств автоматизации.

Схема построения кода условного обозначения прибора систем автоматизации показана на рис. 18.



*Рис. 18. Схема построения кода условного обозначения прибора систем автоматизации*

Функциональные признаки, если несколько в одном приборе, то порядок расположения следующий: I, R, C, S, A (индикация, регистрация, управление, сигнализация, авария).

В нижней части окружности, наносится обозначение позиций (цифровые или буквенно-цифровые).

В схемах автоматизации широко используются обозначения различных устройств, на основе стандартов ЕСКД. Некоторые примеры отдельных устройств приведены в табл. 3 и 4.

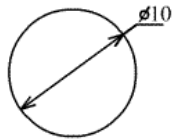
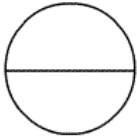
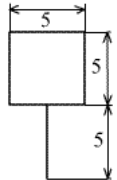
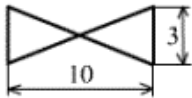
Условные обозначения измеряемых величин выполняются следующими заглавными буквами латинского алфавита:

- D** – плотность;
- E** – любая электрическая величина;
- F** – расход;
- G** – размер, положение, перемещение;
- H** – ручное воздействие;

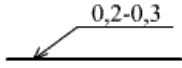
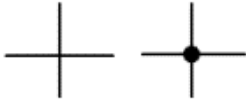
- К** – время, временная программа;  
**L** – уровень;  
**M** – влажность;  
**N** – резерв (аппаратура управления электродвигателей);  
**O** – резерв;  
**P** – давление, вакуум;  
**Q** – качество (состав, концентрация и т. п.);  
**R** – радиоактивность;  
**S** – скорость, частота;  
**T** – температура;  
**U** – несколько разнородных величин, измеряемых одним прибором;  
**V** – вязкость;  
**W** – масса;  
**X** – нереккомендованная резервная буква.  
 Функции выполняемые приборами:  
**A** – сигнализация;  
**C** – регулирование, управление;  
**I** – показание;  
**R** – регистрация;  
**S** – включение, отключение, переключение.

Таблица 3

*Графическое обозначение элементов автоматизации*

Обозначение	Наименование
	Первичный измерительный преобразователь (датчик); прибор, устанавливаемый по месту;
	Прибор, устанавливаемый на щите, пульте
	Исполнительный механизм. Общее обозначение
	Регулирующий орган



Обозначение	Наименование
	Общее обозначение линии связи
	Пересечение линий связи с соединением и без него.

Для уточнения значений измеряемой величины и указания верхнего и нижнего пределов измеряемой величины также используются следующие обозначения:

**D** – разность, перепад;

**F** – соотношение, доля, дробь;

**H** – верхний предел измеряемой величины;

**I** – автоматическое переключение;

**L** – нижний предел измеряемой величины;

**Q** – интегрирование, суммирование по времени.

Для функциональных признаков приборов применяются следующие обозначения:

**E** – первичные преобразователи (термопары, термометры, сопротивления и т. п.);

**T** – приборы с дистанционной передачей показаний (манометрические термометры);

**K** – приборы со станциями управления (переключатель «автоматическое-ручное»);

**Y** – преобразователь сигналов и вычислительных устройств.

Эти дополнительные обозначения вписываются в верхней части окружности, на втором месте после буквы, обозначающей измеряемую величину. Например: TE – термопара, термометр сопротивления; PT – бесшкальный манометр с дистанционной передачей.

При обозначении преобразователей сигналов и вычислительных устройств применяются следующие дополнительные буквенные обозначения и символы:

**E, P, G** – сигналы, соответственно, электрический, пневматический, гидравлический;

**A, D** – сигналы, соответственно, аналоговые и дискретные;

$\Sigma$ , **K**, **X**,  $:$ ,  $f_n$ ,  $\sqrt{x}$  – операции, соответственно, суммирования, умножения на постоянный коэффициент, умножения, деления, возведения сигнала в степень, извлечения корня.

Таблица 4

## Графические обозначение элементов схем автоматизации

Наименование	Обозначение
Двигатель асинхронный с короткозамкнутым ротором	
Селсин-датчик угла поворота и селсин-приемник	
Трансформатор напряжения измерительный	
Предохранитель плавкий, общее обозначение	
Звонок электрический	
Гудок	
Резистор переменный	
Конденсатор постоянный емкости	
Конденсатор электролитический	
Датчик измеряемой неэлектрической величины	
Диод. Общее обозначение. Тиристор триодный, запираемый: а – по аноду; б – по катоду	
Катушка электромеханического устройства (реле)	
Контакт коммутационного устройство: а – замыкающий; б – размыкающий; в – переключающий	
Выключатель кнопочный с контактами: а – замыкающий; б – размыкающим	
Лампа накаливания осветительная и сигнальная	

Эти дополнительные буквенные обозначения указываются вне окружности, справа от нее.

Графическое обозначение элементов автоматизации приведено в табл. 5.

Таблица 5

*Примеры условных обозначений приборов и средств автоматизации*

Наименование и функции	Обозначение
Первичный измерительный преобразователь для измерения температуры, установленной по месту. Например: термомпара, термометр сопротивления	
Прибор для измерения температуры показывающий, установленной по месту. Например: термометр ртутный, термометр манометрический.	
Прибор для измерения температуры показывающей, установленный на щите. Например: милли-вольтметр, потенциометр.	
Прибор для измерения температуры с автоматическим убегающим устройством, регистрирующий установленный на щите. Например: многоточечный самопишущий потенциометр, мост автоматический.	
Прибор для измерения температуры регистрирующий, регулирующий, установленный на щите. Например: самопишущий регулятор температуры.	
Регулятор температуры бесшкальный, установленный по месту. Например: дилатометрический регулятор температуры.	
Комплект для измерения температуры регистрирующий, регулирующий, снабженный станцией управления, установленный на щите	
Регулятор давления, работающий без использования построенного источника энергии (прямого действия)	
Прибор для измерения давления (разряжения) показывающий, установленный по месту – показывающий манометр, тягомер, напорометр и т. п.	
Прибор для измерения давления (разряжения) регистрирующий, установленный на щите – самопишущий манометр или другой вторичный прибор регистрации давления	
Прибор для измерения любой электрической величины показывающий, установленный по месту	
Прибор для измерения уровня бесшкальный, с дистанционной передачей показаний, установленный по месту	

Наименование и функции	Обозначение
Прибор для измерения плотности раствора бесшкальный, с дистанционным передачей показаний, установленный по месту	
Прибор для измерения влажности регистрирующий (вторичный), установленный на щите	
Прибор для измерения скорости вращения привода регистрирующий, установленный по месту. Например: тахогенератор.	
Прибор для измерения вязкости раствора показывающий, установленный на щите	
Пусковая аппаратура для управления электродвигателем	
Аппаратура ручного дистанционного управления, снабженная устройством сигнализации, установленная на щите	
Первичный измерительный преобразователь для измерения качества продукта, установленный по месту. Например: датчик рН-метра.	
Прибор для измерения радиоактивности, показывающий, контактным устройством, установленный по месту. Например: прибор для показания и сигнализации предельно-допустимых концентраций $\alpha$ и $\beta$ –лучей.	
Прибор для измерения вязкости раствора, показывающий, установленный по месту. Например: вискозиметр показывающий.	
Преобразователь сигнала, установленный на щите. Входной сигнал электрический, выходной – тоже электрический. Например: преобразования термоЭДС термопары в сигнал постоянного тока.	
Преобразователь сигнала, установленный по месту. Входной сигнал – пневматический, выходной – электрический.	
Первичный измерительный преобразователь (чувствительный элемент) для измерения расхода, установленный по месту. Например: сопло, диафрагма, индукционный датчик расхода и т. п.	
Вычислительное устройство, выполняющее функцию умножения. Например: множитель на постоянный коэффициент К.	

В функциональных схемах автоматизации, последовательность буквенных обозначений должно быть следующей:

- обозначение основной измеряемой величины;
- обозначение, дополнительное (уточняющее основную) измеряемую величину;
- обозначение функционального признака прибора.

Функциональная схема является техническим документом, определяющим функционально-блочную структуру отдельных узлов автоматического контроля, управления и регулирования технологического процесса и оснащения объекта управления приборами и средствами автоматизации. Объектом управления в системах автоматизации технологических процессов является совокупность основного и вспомогательного оборудования вместе с встроенными в него регулирующими органами.

При разработке функциональной схемы автоматизации технологического процесса необходимо решить следующие задачи:

- задачу получения первичной информации, как о состоянии технологического процесса, так и оборудования;
- задачу непосредственного воздействия на ТП для управления им и стабилизации технологических параметров процесса;
- задачу контроля и регистрации технологических параметров процессов и состояния технологического оборудования.

При разработке функциональной схемы определяют:

- 1) целесообразный уровень автоматизации технологического процесса;
- 2) принципы организации контроля и управления технологическим процессом;
- 3) технологическое оборудование, управляемое автоматически, дистанционно или в обоих режимах по заданию оператора;
- 4) перечень и значения контролируемых и регулируемых параметров;
- 5) методы контроля, законы регулирования и управления;
- 6) пороги сигнализации;
- 7) объем автоматических защит и блокировок автономных схем управления технологическими агрегатами;
- 8) комплект технических средств автоматизации, вид энергии для передачи информации;
- 9) места размещения аппаратуры на технологическом оборудовании, на щитах и пультах управления.

В соответствии с ГОСТ 21.408–93 различают два способа выполнения схемы автоматизации – развернутым и упрощенным.

При упрощенном способе выполнения схем автоматизации контуры контроля и управления, а также одиночные приборы наносят рядом с изображением технологического оборудования и коммуникаций.

В таблице контуров управления указывают номера контуров. На схеме изображают исполнительные механизмы, регулирующие органы и линию связи, соединяющую контуры с исполнительными механизмами. Предельные рабочие значения измеряемых (регулируемых) величин указывают рядом с графическими обозначениями контуров или в дополнительной графе таблицы контуров.

Состав каждого контура должен быть приведен на:

- принципиальной (электрической, пневматической) схеме контроля, регулирования и управления;
- схеме соединений внешних проводок.

Когда на схемах автоматизации сложно привести полный состав элементов контура, разрабатывают структурную схему контура, пример выполнения которой приведен на рис. 19. При развернутом способе выполнения схем автоматизации в верхней части функциональной схемы должна быть приведена схема технологического процесса или объекта управления и условные обозначения датчиков (приборов измерения), предназначенных для измерения технологических параметров. Это уровень первичных измерительных преобразователей (ПИП) (рис. 20).

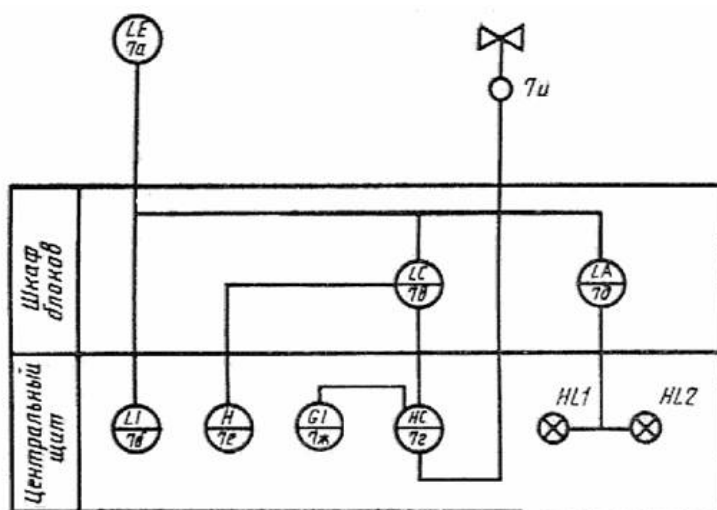


Рис. 19. Структурная схема контура регулирования уровня жидкости

ВИП (вторичные измерительные приборы), т. е. элементы щита и пульта управления должны быть изображены в нижней части схемы в специальной таблице произвольных размеров. В её столбцах следует расположить условные обозначения приборов, средств автоматизации, аппараты управления и сигнализации, устанавливаемые непосредственно на щитах и(или) пультах управления. Необходимо обратить внимание, что здесь следует использовать щитовые обозначения приборов, если ПИП устанавливается на щите (например, в виде самописца или милли-

амперметра) и если используется контроллерная или дистанционная функции, то обозначение должно соответствовать ГОСТ 36-27-77. Кроме вторичных приборов здесь же должно быть показано, каким образом реализуются контуры автоматического управления в АСУ ТП. (рис. 19).

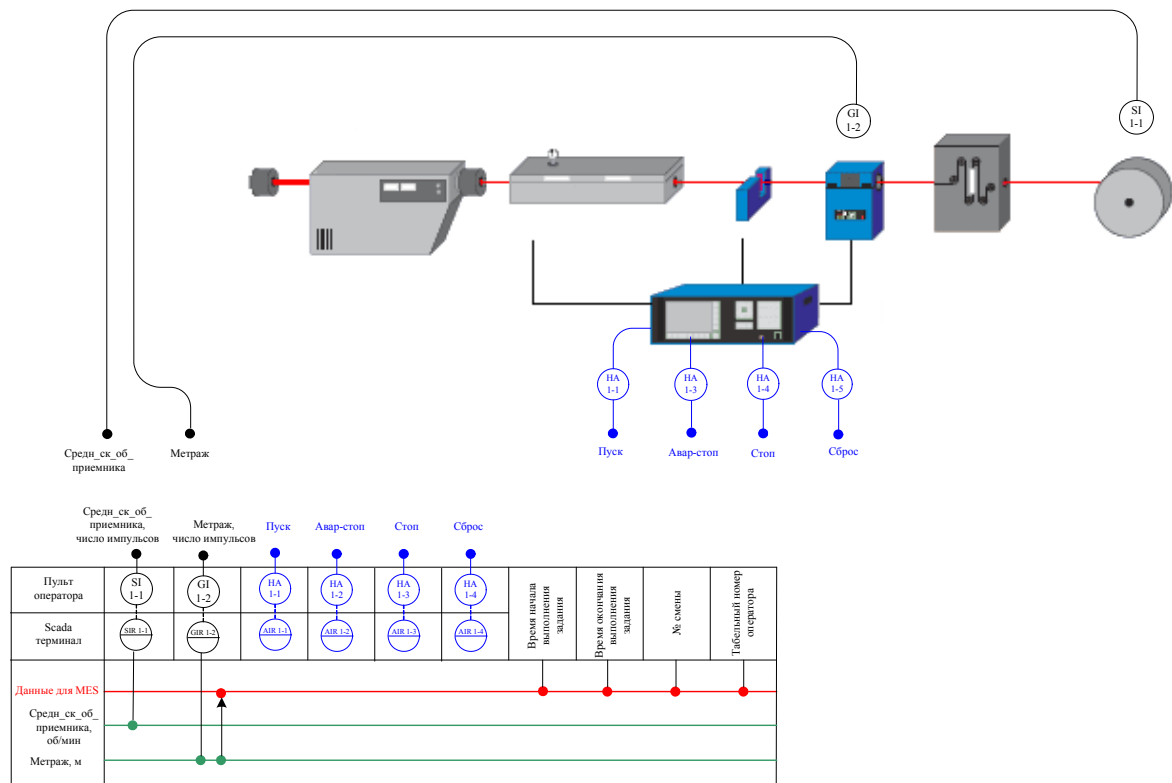


Рис. 20. Функциональная схема автоматизации

Связь между первичным преобразователем и вторичными приборами показывается сплошной линией или обрывом линии с нумерацией.

В нижней части таблицы в виде сплошных шин приводится перечень вычисляемых функций на основе этих сигналов на контроллере и (или) в SCADA-системе (рис. 20).

## 10. ВЫБОР КОНТРОЛЛЕРНЫХ СРЕДСТВ РЕАЛИЗАЦИИ ИКСУ

Задачей выбора средств реализации проекта является анализ вариантов, выбор компонентов ИКСУ и анализ их совместимости.

В этом разделе должен быть обоснован выбор контроллерного оборудования. В последующих разделах должен быть обоснован выбор как измерительных, так и исполнительных устройств, а также ПО АСУ ПП и АСУ ТП.

Контроллерное оборудование осуществляет сбор и нормализацию сигналов (приведение к унифицированному уровню сигналов), преобразование их в цифровой код, вычисление при необходимости и формирование управления и информационных кадров в зависимости от выбранного протокола взаимосвязи между контроллером и SCADA-системой.

Современный рынок средств автоматизации предлагает широкий спектр аппаратных и программных устройств для построения надежных и удобных в эксплуатации систем. Не существует отрасли промышленности, в которой не было бы потребности применения контроллеров. Одними из их главных преимуществ является снижение, вплоть до полного исключения, влияния, так называемого человеческого фактора на управляемый процесс, сокращение персонала, минимизация расходов сырья, улучшение качества исходного продукта, и в конечном итоге существенное повышение эффективности производства.

ПЛК ИКСУ представляют собой устройство, предназначенное для сбора, преобразования, обработки, хранения информации и выработки команд управления. Они реализованы на базе микропроцессорной техники и работают в локальных и распределенных системах управления в реальном времени в соответствии с заданной программой. По техническим возможностям, которые определяют уровень решаемых задач, ПЛК делятся на классы: нано, микро, малые, средние и большие. Первоначально они предназначались для замены релейно-контактных схем, собранных на дискретных компонентах – реле, счетчиках, таймерах, элементах жесткой логики. Сейчас они решают, как вычислительные, так и коммутационные задачи.

Программирование ПЛК, как правило, осуществляется на одном или нескольких языках стандарта IEC-61131.3. Для тех, кто привык к релейно-контактным схемам, рекомендуется работать с языком, созданным на их основе (Ladder Diagram), а тем, кому понятней электронные схемы, могут воспользоваться языком функциональных блочных диа-



грамм (Functional Block Diagram). Опытные программисты могут использовать возможности всех языков.

Современный ПЛК может обрабатывать дискретные и аналоговые сигналы, управлять клапанами, шаговыми двигателями, сервоприводами, преобразователями частоты, осуществлять регулирование. Высокие эксплуатационные характеристики делают целесообразным применение ПЛК везде, где требуется логическая обработка сигналов от датчиков. Применение ПЛК обеспечивает высокую надежность, простое тиражирование и обслуживание устройств управления, ускоряет монтаж и наладку оборудования, обеспечивает быстрое обновление алгоритмов управления (в том числе и на работающем оборудовании).

Кроме прямых выгод от применения ПЛК, обусловленных низкой ценой и высокой надежностью, есть и косвенные. В частности, в ПЛК имеется возможность реализовать дополнительные функции, не усложняя и не увеличивая стоимость готовой продукции, которые помогут полнее реализовать возможности оборудования. Быстрое развитие микроэлектроники позволяет ожидать дальнейшего снижения цен и улучшения характеристик ПЛК, что является дополнительным стимулом к их применению.

При обосновании выбора типа ПЛК необходимо учитывать следующее.

В случае наличия машинных контроллеров на технологическом оборудовании, ПЛК коммуникационной (обычно межуровневой) связи должно обеспечить «прозрачную» связь машинного контроллера с сервером SCADA. Наиболее подходящим вариантом (2008 г.) может быть, например, контроллер типа I-7088.

В случае отсутствия машинных контроллеров в технологическом оборудовании, рекомендуется в первую очередь обратить внимание на возможность применения в проектируемой ИКСУ ПЛК типа **FX** или **S7**.

Дополнительным основанием выбора ПЛК является необходимость удовлетворения *системных требований проекта*. Системный анализ требований проекта должен позволить ответить на следующие вопросы.

- Какие требуются периферийные устройства?
- Применяются ли битовые операции или только числовые?
- Сколько требуется манипуляций для обработки данных?
- Должна ли система управляться по прерываниям, по готовности или по командам человека?
- Каким количеством устройств (битов ввода/вывода) необходимо управлять?
- Какие устройства из числа многих возможных типов I/O устройств должны контролироваться управляться: терминалы, выключатели,

реле, клавиши, сенсоры (температура, свет, напряжение и т. д.), визуальные индикаторы (LCD дисплеи, LED), аналого-цифровые (A/D), цифро-аналоговые (D/A) преобразователи?

- Одно или несколько напряжений питания требуется для системы?
- Насколько отказоустойчив источник питания?
- Будет ли работать устройство при напряжении сети питания?
- Должны ли напряжения удерживаться в узком фиксированном диапазоне изменений, или же система может работать при большой нестабильности?
- Какой рабочий ток?
- Изделие должно работать от сети или от батарей?
- Если от батарей, должны ли использоваться перезаряжаемые батареи и если это так, то каково время работы без перезарядки, и какое для нее требуется время?
- Существуют ли ограничения по размеру, весу, эстетическим параметрам, таким как форма и/или цвет?
- Существуют ли какие-либо специфические требования к условиям окружающей среды, таким как температура, влажность, атмосфера (взрывоопасная, коррозионная и т. д.), давление/высота?
- Пользовательское программное обеспечение должно базироваться на дисках или ROM? Изделие работает в реальном времени, и если да, собираетесь ли вы создать или приобрести ядро программ реального времени или, возможно, будет достаточно обычной широко используемой версии?

Основной целью выбора микроконтроллера является нахождение такого, который полностью бы удовлетворял техническому заданию (сформулированным выше требованиям), и в тоже время был бы наименее дорогим. Особенно следует учесть сервисные возможности поставщика, в частности, его техническую поддержку. Без технической поддержки проект обычно обречен на неудачу.

Затем, следует определиться какой набор системных функций должен выполнять микроконтроллер. Как правило, микроконтроллер представляет собой законченную микропроцессорную систему, выполненную на одном кристалле, которая содержит основные функциональные блоки микропроцессорной системы (центральный процессор, постоянное запоминающее устройство, оперативное запоминающее устройство и периферийные устройства для ввода и вывода информации).

**Системная функция ОЗУ.** Автономные устройства часто в течение длительного промежутка времени не имеют возможности передачи данных на диспетчерский пункт, поэтому в этом случае необходимо место для хранения информации.

Одним из решений является хранение данных в энергозащищенных ОЗУ контроллера. При этом следует учитывать, что тем больше данных может в нем храниться, чем больше объем ОЗУ. Сейчас для этих целей все чаще используется флэшпамять.

Для автономных систем, очень важен также такой параметр как напряжение питания устройства хранения информации. Если напряжение питания снижается ниже минимально допустимого уровня, но выше напряжения хранения информации, то хотя программа на ПЛК не выполняется, данные в ОЗУ все-таки сохраняются.

**Системный интерфейс ПЛК.** Одной из важнейших особенностей микроконтроллера в автономном устройстве является наличие стандартного интерфейса разного типа. Интерфейс служит для целей организации связи автономного устройства с другими устройствами (с компьютером, интеллектуальным датчиком, исполнительным органом) и связи микроконтроллера с другими микросхемами на плате. Для связи внутренних модулей контроллера используется интерфейс производителя ПЛК (например, в ПЛК ф. Siemens используется Profibus). Для связи с внешним компьютерным оборудованием рекомендуется использовать интерфейс Ethernet (возможны варианты RS-485 (232), CAN и др.).

**Диапазон питания ПЛК.** Требования, предъявляемые к микроконтроллерам удаленных (распределенных) устройств, несколько отличаются от стандартных требований. Тогда как в стационарных устройствах требования к пониженному энергопотреблению микроконтроллеров не являются определяющими, то в автономных удаленных устройствах они выходят на передний план. Зачастую автономные устройства – это системы, которые имеют автономное питание (например, питание от батареек или аккумуляторов). В этом случае желательно использовать либо микроконтроллер с расширенным, либо с пониженным диапазоном питания. Микроконтроллеры с расширенным диапазоном питания относительно неприхотливы к напряжению питания и подходят как для устройств с сетевым, так и с автономным питанием. Микроконтроллеры с пониженным диапазоном питания предназначены для изделий с автономным питанием, т. к. их ток потребления в несколько раз меньше тока потребления других микросхем. В то же время следует помнить, что микроконтроллеры с пониженным диапазоном питания обычно имеют меньшую максимальную частоту тактирования.

Особую значимость имеют контроллеры, для которых на рынке есть готовые аппаратно-программные модули поддержки коммуникационных протоколов.

## 11. ВЫБОР ДАТЧИКОВ И ИСПОЛНИТЕЛЬНЫХ МЕХАНИЗМОВ

При выборе датчиков в пояснительной записке проекта необходимо привести следующие расчеты и сведения [1, 2]:

- тип датчика;
- точность (погрешность) измерения;
- диапазон измерения датчика.
- единицы измерения датчика;
- диапазон выходного сигнала датчика;
- условия эксплуатации (в том числе физическая IP-защищенность, требования к источникам питания и др.);
- интерфейсы связи с компьютерной средой;
- стоимость (в том числе расходы в процессе их эксплуатации);
- положительный опыт их применения (в том числе техническая поддержка, показатель применяемости, и др.).

### *Интерфейсы выходных сигналов измерительных приборов*

В типовой многоуровневой структуре АСУ ТП уровень первичного измерительного преобразователя (ПИП) связан или с уровнем контроллеров, или с уровнем вторичных измерительных преобразователей ВИП посредством проводов выходных сигналов.

Различают следующие выходные сигналы первичных измерительных приборов (рис. 21):

ПИП с токовым аналоговым выходом;

ПИП с цифровым выходным сигналом;

ПИП с индуктивной связью.

ПИП с индуктивной связью являются устаревшими приборами и в большинстве случаев подлежат замене на ПИП с токовым или цифровым сигналом.

ПИП с токовым аналоговым выходом имеют встроенный источник тока – генератор тока с некоторым внутренним сопротивлением  $R_{вн}$ . Источник тока управляется функцией  $f(x)$  измерения параметра  $x$  (рис. 22). Ток  $i = f(x)$  поступает в линию связи и на входном нагрузочном резисторе  $R_n$  вторичного преобразователя создает соответствующее падение напряжения, которое далее преобразуется в цифровое значение измеряемого параметра  $x$ . ПИП данного вида имеют, как правило, унифицированные выходные сигналы постоянного тока в диапазонах

$\{0...5\}$ ,  $\{0...20\}$  или  $\{4...20\}$  мА. Току  $i = 0$  или  $i = 4$  мА соответствует некоторое минимальное значение измеряемого параметра  $x$ , а току  $i = i_{\text{макс}}$  из  $\{5...20\}$  мА – максимальное значение этого параметра. Максимально допустимая длина линии связи между ПИП и ВИП зависит от величины внутреннего сопротивления  $R_{\text{вн}}$  ПИП, активного сопротивления  $R_{\text{л}}$  линии связи, входного сопротивления  $R_{\text{н}}$  ВИП, ожидаемого уровня помехи и, обычно, не должна превышать несколько десятков метров. Число проводов связи между ПИП и ВИП обычно 2, 3 или 4. Оно зависит от схемы подключения источника питания или от типа чувствительного элемента ПИП (например, термосопротивление).

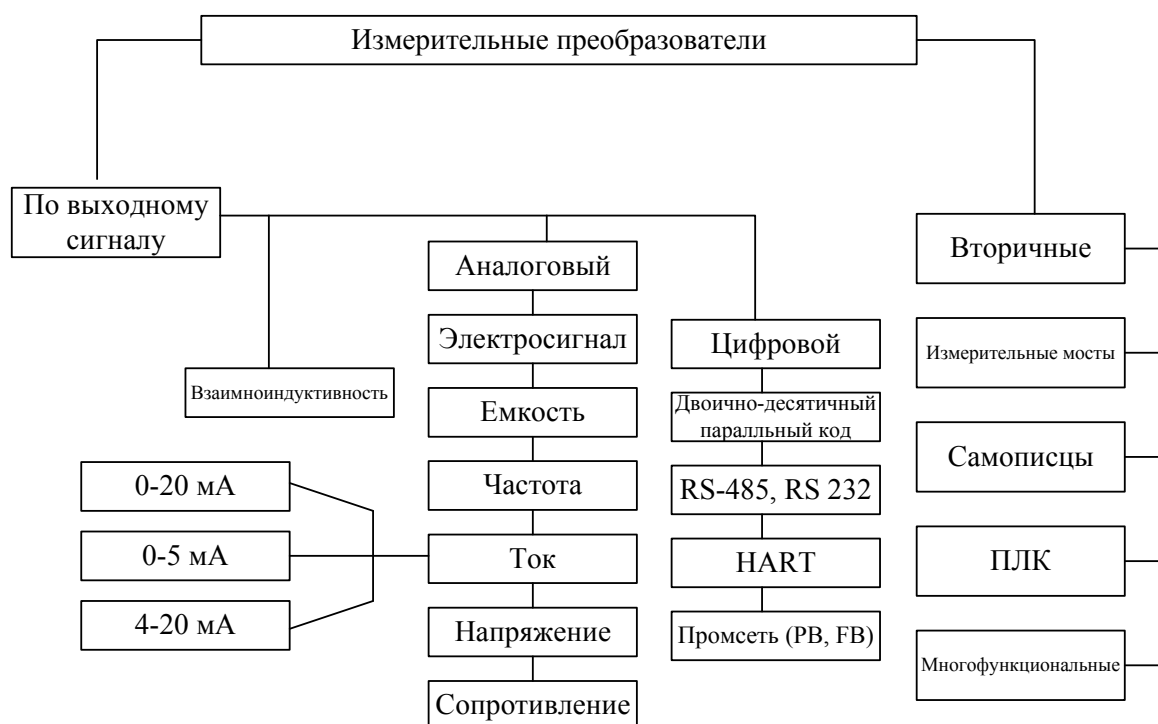


Рис. 21. Классы сигнально измерительных устройств

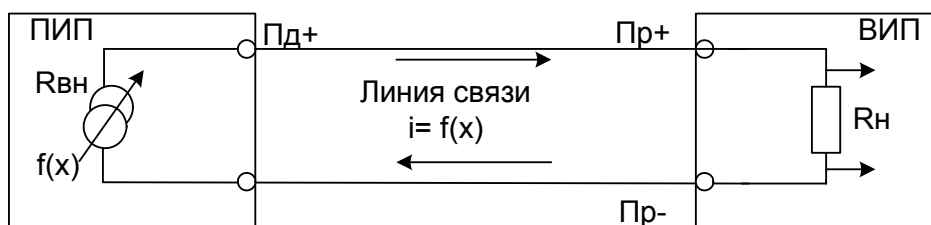


Рис. 22. Двухпроводная токовая связь ПИП и ВИП

Поставщики измерительных приборов часто ориентируют потребителей на двухпроводный вариант подключения при токовом сигнале  $\{4...20\}$  мА и 4-х проводное соединение при  $\{0...20\}$  мА.

Применение унифицированных сигналов регламентировано ГОСТ 26.011–80. Среди стандартных сигналов тока и напряжения наиболее удобным и популярным является токовый сигнал 4...20 мА. Причины этого в том, что он наилучшим образом решает проблемы, связанные с передачей сигналов от удаленных датчиков к вторичным измерительным приборам.

Сигналы первичных преобразователей, как правило, очень малы. Например, сигналы термопар обычно меньше 50 мВ. В промышленных условиях сильные электромагнитные помехи могут создавать паразитные сигналы, в сотни и тысячи раз превышающие полезные. Сильные токовые сигналы уровня 4...20 мА работают на низкоомную нагрузку, в результате они меньше подвержены такому влиянию.

Для передачи токовых сигналов можно использовать соединительные провода, более дешевые по сравнению с другими. При этом требования к величине их сопротивления также могут быть снижены.

Еще одним преимуществом токового сигнала 4...20 мА является то, что при работе с ним легко обнаружить обрыв линии связи – ток будет равен нулю, т. е. выходит за возможные пределы. Обрыв в цепи с сигналом 0...5 мА обнаружить нельзя, так как ток, равный нулю, считается допустимым. Для обнаружения обрыва в цепях с унифицированными сигналами напряжения (0–1 В или 0–10 В) приходится применять специальные схемотехнические решения, например, «подтяжку» более высоким напряжением через высокоомный резистор.

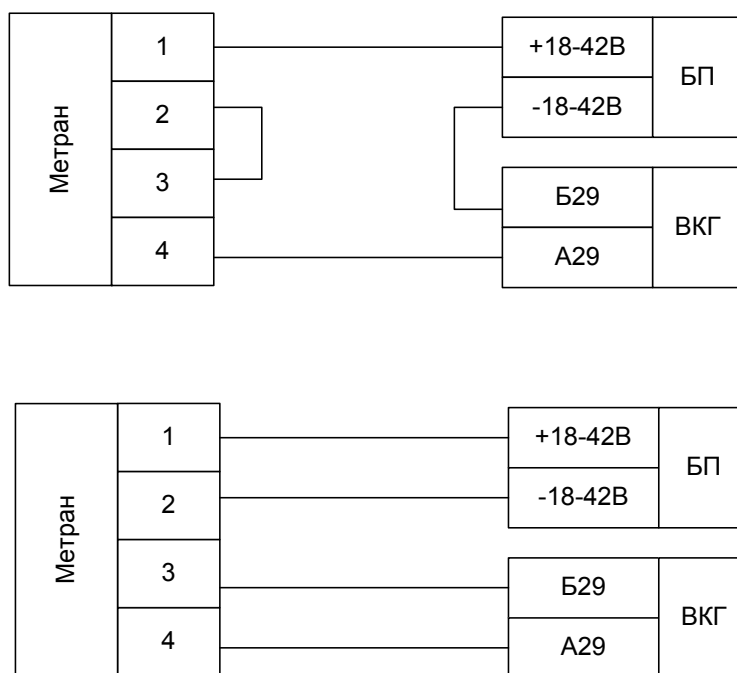


Рис. 23. Схемы подключения 4...20 мА и 0...20 мА

Схемы подключения источников питания в схеме 4...20 мА и 0...20 мА показаны на рис. 23.

**ПИП с цифровым выходным сигналом** имеют, как правило, гальванически развязанный выход с открытым коллектором транзистора или релейным «сухим» контактом, питание которого производится со стороны источника тока, встроенного в ВИП. При этом в зависимости от того, закрыт или открыт выход ПИП, величина тока в линии связи имеет значение  $i_{\text{мин}}$  или  $i_{\text{макс}}$ , что определяется дискретным характером процесса измерения преобразователем параметрах энергоносителя. Последовательность «замыканий/размыканий» выходной цепи ПИП порождает на входе ВИП последовательность токовых двоичных импульсов («0», «1») определенной частоты и длительности, которая используется либо для цифрового представления измеряемого параметра  $x$ , либо для дискретного представления (например, норм/авар, вкл/выкл). Как правило, ток в линии связи не превышает 10...20 мА. Максимально допустимая длина линии связи зависит от величины тока ВИП, активного сопротивления линии и может достигать до 3 км.

**Цифровой ПИП** может иметь следующие выходные сигналы:

- ПИП с токовой петлей (CL);
- ПИП с выходом RS 232 или RS 485;
- ПИП с HART выходом;
- ПИП с полевой шиной (PB или FB).

**ПИП с токовой петлей (CL)** относится к классу универсальных двухточечных радиальных интерфейсов удаленного последовательного доступа к системам. Это соединение широко применяется в промышленном оборудовании, так как позволяет осуществить связь по физическим линиям на дальние расстояния до 3 км) без использования аппаратуры передачи данных (модемов). Интерфейс CL представляет собой двух- и четырехпроводную линию, образующую токовую петлю с дискретно переключаемым источником тока и приемником. Последовательные данные от источника к приемнику (рис. 24) передаются побитно и побайтно асинхронным способом сигналами постоянного тока  $i = 20$  мА (иногда используются сигналы 10, 40 или 80 мА). Ток, превышающий 17 мА, представляет логическую «1»(маркер), а ток, меньший чем 2 мА, – логический «0» (пробел). Одно из взаимодействующих устройств должно быть активным и служить источником тока, а другое пассивным (приемником).

Интерфейс CL имеет, как правило, протяженную линию передачи, которая подвержена влиянию внешних помех и перенапряжений. Поэтому схемы передатчика и приемника линии гальванически развязываются за счет использования оптронов и изолированных источников питания.

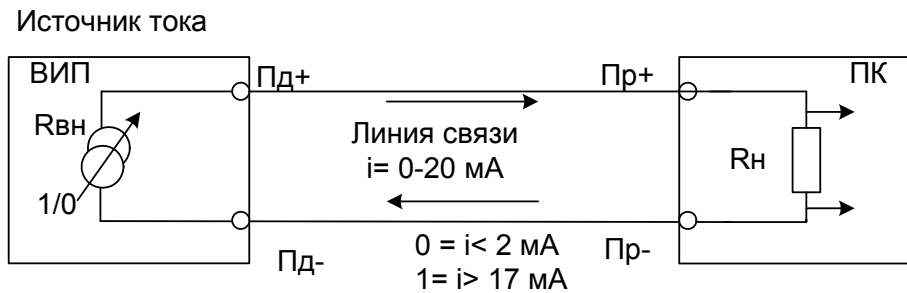


Рис. 24. Соединение ВИП с компьютером линией связи типа CL

Максимальная скорость передачи сигналов по токовой петле – 9600 бит/с при длине линии связи до 300 м. Снижая скорость передачи, можно почти пропорционально увеличивать длину линии: на скорости 1200 бит/с длина линии увеличивается до 2000 м.

Токовая петля используется обычно для сопряжения одного передатчика и одного приемника, но, в принципе, она может охватывать и несколько последовательно соединенных пассивных приемников. Токовая петля позволяет передавать данные по двухпроводной линии в одном направлении (симплексная связь): от передатчика к приемнику. Для дуплексной связи одновременной передачи в двух противоположных направлениях) используется четырехпроводная линия.

**Интерфейс ПИП с RS 232** применим для установления синхронной и асинхронной связи между устройствами в симплексном, полудуплексном (двухпроводный вариант) и дуплексном режимах (четырёхпроводный вариант). Скорость передачи данных по интерфейсу RS\_232C составляет от 50 до 19200 бит/с. Максимальная длина линий связи при максимальной скорости не превышает 16 м. На практике это расстояние может быть существенно увеличено при снижении скорости передачи и использовании экранированного кабеля с малой собственной емкостью (при скорости 1200 бит/с максимальная длина неэкранированного кабеля достигает 900 м). Типичный формат асинхронной передачи данных по интерфейсу представляет собой следующий пакет: байт данных оформляется стартовым битом, необязательным битом паритета и стоповым битом. Любое сообщение, передаваемое по интерфейсу асинхронным способом, представляет совокупность байтов данных, оформленных указанным образом. Сигналы этого интерфейса передаются перепадами напряжения величиной (3...15) В. Интерфейс RS-232 имеется в каждом PC-совместимом компьютере, где используется в основном для подключения манипулятора типа «мышь», модема, и реже – для передачи данных на небольшое расстояние из одного компьютера в другой. Интерфейс RS-232 принципиально не позволяет создавать сети, так как соединяет только 2 устройства (так называемое соединение «точка – точка»).



**Интерфейс ПИП с RS 485** ориентирован при 1 Мбит скорости передачи на совместную работу до 32 источников и 32 приемников данных. Такой интерфейс позволяют объединять приборы в разветвленные сетевые структуры и поэтому в последние годы они все чаще реализуются в различных приборах, в частности, в приборах учета энергоресурсов.

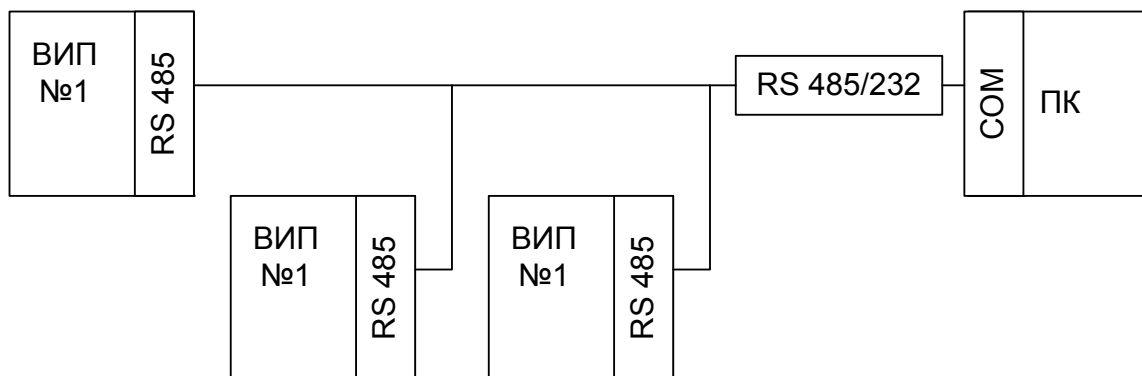


Рис. 25. Многоточечная связь по интерфейсу RS 485

Сигналы интерфейса RS-485 передаются дифференциальными перепадами напряжения величиной (0,2...8) В, что обеспечивает высокую помехоустойчивость и общую длину линии связи до 1 км (и более с использованием специальных устройств – повторителей).

**HART интерфейс связи** – это открытый стандартный гибридный протокол двунаправленной связи, который предусматривает передачу цифровой информации поверх стандартного аналогового сигнала 4...20 мА.

**Промышленные шины связи CAN, Foundation Fieldbus и Profibus** реализуются на основе типовых стандартных интерфейсов. К промышленным шинам, применяемым в производственных (полевых) условиях, предъявляются следующие основные требования:

- широкий диапазон рабочих температур;
- помехозащищенность трактов передачи данных (способ передачи);
- реальный масштаб времени (скорость);
- большие расстояния объектов взаимодействия (длина);
- гибкая структура шин передачи данных (топология шины).

Под широким диапазоном температур подразумевается температура в пределах от  $\pm 40$  °С до  $\pm 85$  °С. Этот диапазон температур необходим для работы в полевых условиях.

Помехозащищенность трактов передачи данных зависит конкретно от приёмопередатчиков и физической линии (тип кабеля, сечение, волновое сопротивление).

Оптимальными решениями для полевых условий являются приёмопередатчики с дифференциальными уровнями сигналов и линии передачи на витой паре.

Системные магистрали на базе промышленных шин должны обеспечивать своевременную и подлежащую расчетам передачу данных в реальном масштабе времени.

Полевые шины применяются как в централизованных, так и в распределенных системах, где расстояния между объектами взаимодействия могут составлять более 1000 метров.

Гибкость структуры шин передачи данных предполагает использование сегментированных линий типа «линия», «дерево», «звезда», «кольцо».

При разработке проекта необходимо обосновать погрешность канала измерения. По каждому измерительному каналу в пояснительной записке необходимо сделать резюме, например, со следующим содержанием.

*Датчик давления был выбран в соответствии с рекомендацией межгосударственного нормативного документа «Обеспечение эффективности измерений при управлении технологическими процессами» с учетом требования к погрешности канала измерения не более 0,3 % с заданной разрядностью АЦП (10 разрядов).*

*Расчет погрешности измерения датчика давления был произведен по формуле:*

$$\delta_1 \leq \sqrt{\delta^2 - (\delta_2^2 + \delta_3^2 + \delta_4^2 + \delta_5^2)},$$

где  $\delta = 0,3 \%$  – требуемая погрешность измерения канала измерений;  
 $\delta_2 = 0,05$  – погрешность передачи по каналу измерений;  $\delta_3$  – погрешность, вносимая АЦП;  $\delta_4$  и  $\delta_5$  – дополнительные погрешности, вносимые соответственно окружающей температурой и вибрацией.

Погрешность, вносимая 10-и разрядным АЦП, была рассчитана следующим образом:

$$\delta_3 = \frac{1 \cdot 100}{2^{10}} = 0,1 \%$$

При расчете были учтены дополнительные погрешности, вызванные влиянием:

- температуры окружающего воздуха;
- вибрации.

Дополнительная погрешность, вызванная температурой окружающего воздуха:

$$\delta_4 = \frac{0,3 \cdot 34}{100} = 0,102 \%$$

*Дополнительная погрешность, вызванная вибрацией:*

$$\delta_5 = 0,3 \cdot 0,19 = 0,057 \% .$$

*Таким образом, расчет погрешность датчика давления:*

$$\delta_1 \leq 0,254 \% .$$

*По результатам расчета был выбран «Метран-22ДД» модель 2460 со следующими техническими характеристиками:*

*верхний предел измерения – 10 МПа; предел допускаемой основной погрешности  $\pm 0,25$  %; выходной сигнал – 4...20 мА; питание – постоянный ток напряжением  $36 \pm 0,72$  В; масса – 10 кг. Изготовитель – промышленная группа «Метран».*

*Измерительный прибор обеспечивает непрерывное преобразование значения измеряемого параметра в унифицированный токовый выходной сигнал. Преобразователь обеспечивает его работу со ВТО-ричной регистрирующей, показывающей аппаратурой, регуляторами и другими устройствами автоматики, работающими от стандартного входного сигнала 0... 5, 0 ... 20 или 4 ... 20 мА постоянного тока.*

*Принцип действия преобразователя основан на использовании тензоэффекта в полупроводниковом материале. Измеряемый параметр поступает в камеру измерительного блока, где он линейно преобразуется в деформацию чувствительного элемента и изменение электрического сопротивления тензопреобразователя, размещенного в измерительном блоке. Электронное устройство преобразует изменение его сопротивления в выходной сигнал. Чувствительным элементом является пластина из монокристаллического сапфира с кремниевыми пленочными тензорезисторами, прочно соединенными с металлической мембраной тензопреобразователя. Пластина и полупроводниковый материал не вступают в активную химическую реакцию с окружающей средой, поэтому не требуется периодической оперативной калибровки ПИП.*

## 12. ВЫБОР (ОБОСНОВАНИЕ) АЛГОРИТМОВ УПРАВЛЕНИЯ АСУ ТП

В ИКСУ на разных уровнях управления используются алгоритмы АСУ ТП и АСУ ПП.

К алгоритмам АСУ ТП относятся:

- алгоритмы пуска (запуска) технологического оборудования (релейные пусковые схемы);
- релейные или ПИД-алгоритмы автоматического регулирования технологическими параметрами РЦ (управление положением рабочего органа, регулирование температуры, уровня и т. п.);
- алгоритмы управления сбором измерительных сигналов (алгоритмы в виде универсальных логически завершенных программных блоков, помещаемых в ППЗУ контроллеров);
- алгоритмы противоаварийной защиты (ПАЗ).

### *Алгоритмы централизованного управления АСУ ТП в целом*

При представлении программных алгоритмов управления в пояснительной записке должны использоваться схемы, составленные по правилам ГОСТ 19.002 (табл. 6).

Пример алгоритма управления сбором сигналов технологического процесса приведен на рис. 26

Алгоритм предназначен для измерения межфазного уровня жидкости в резервуаре, оснащенный:

- предупредительной сигнализацией значений выше максимального допустимого и остановом или блокировкой пуска насоса Е-6;
- предупредительной сигнализацией значения ниже минимального допустимого;
- аварийной сигнализацией значения ниже минимального предельного и остановом насосов Н-2/1..Н-2/4;
- измерения общего уровня жидкости с аварийной сигнализацией значений выше максимального предельного и закрытием электрозадвижки N5.

В этом алгоритме используется следующая информация:

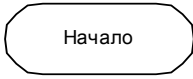

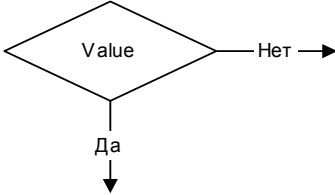
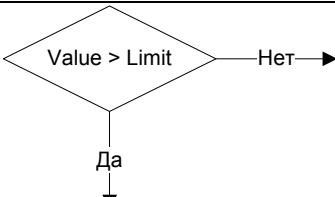
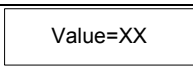

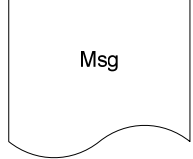


RX\_Lvl\_TE – текущий общий уровень (ТЕ) жидкости в резервуаре RX;

RX\_MFaseLvl\_TE – текущий межфазный уровень в резервуаре RX;

Reg\_RX\_Lvl\_TE – регистровое значение текущего общего уровня (ТЕ) жидкости в резервуаре RX;

Reg\_Error – обрыв или короткое замыкание;  
 Reg\_L1 – превышение первого порога;  
 Reg\_Mask – маскирование;  
 RX\_Lvl\_LL\_TE – значение минимального предельного уровня в RX;  
 Reg\_RX\_MFaseLvl\_TE – регистр уставки параметра «Резервуар-отстойник Р-#. Межфазный уровень»;  
 Reg\_L2 – превышение второго порога;  
 X – номер резервуара.

Таблица 6

	Точка начала выполнения алгоритма (точка входа)
	Точка завершения выполнения алгоритма (точка выхода)
	Проверка Value: Да – Value не равно нулю Нет – Value равно нулю
	Сравнение Value со значением Limit: Да – условие выполняется Нет – в противном случае
	Присвоение Value определенного значения
	Предопределенная операция, блок алгоритма
	Генерация сообщения оператору (информационное, предупредительное или аварийное)
	Перенаправление на следующую страницу схемы
	Назначение перенаправления с предыдущей страницы схемы

При выполнении алгоритма формируются следующие команды:  
 Nasos\_NeedStop – команда «останов насосов Н-2/1..4»;  
 Nasos E6\_NeedStop – команда «останов насоса емкости Е-6»;  
 N1\_CloseCmd – команда «Принудительно закрыть» электрозадвижку N5».

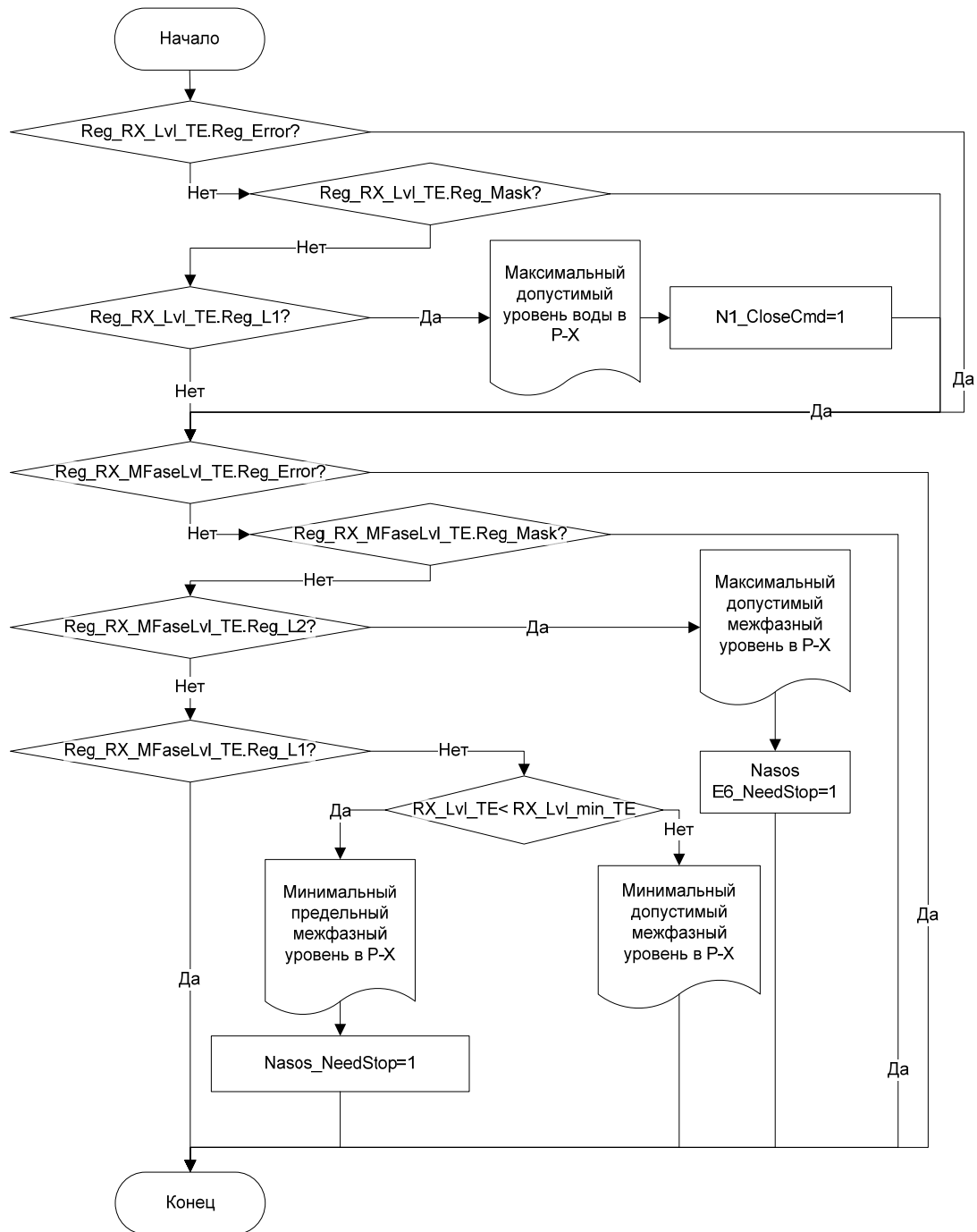


Рис. 26. Алгоритм сбора данных об уровне жидкости врезервуаре Р-3(4)

**Выбор параметра и канала регулирования.** Одним и тем же выходным параметром объекта можно управлять по разным входным каналам. Например, температуру в печи можно регулировать двумя путями – изменением расхода воздуха или подачей газа в печь.

Задача состоит в том, какой из входных параметров (каналов) следует выбирать. При выборе нужного канала управления исходят из следующих соображений.

1. Из всех возможных регулирующих воздействий выбирают такой поток вещества или энергии, подаваемый в объект или отводимый из него, минимальное изменение которого вызывает максимальное изменение регулируемой величины, т. е. коэффициент усиления по выбранному каналу должен быть по возможности максимальным. Тогда, по данному каналу, можно обеспечить более точное регулирование.

2. Диапазон допустимого изменения управляющего сигнала должен быть достаточен для полной компенсации максимально возможных возмущений, возникающих в данном технологическом процессе, т. е. должен быть запас по мощности управления в данном канале.

3. Выбранный канал должен иметь благоприятные динамические свойства, т. е. запаздывание  $\tau$  и отношение  $\tau/T$ , где  $T$  – постоянная времени объекта, должны быть возможно меньшими. Кроме того, изменение статических и динамических параметров объекта по выбранному каналу при изменении нагрузки или во времени должны быть незначительными.

4. Выбранный канал регулирования должен быть согласован с технологическим регламентом ведения процесса.

**Выбор алгоритма автоматического регулирования технологическими параметрами РЦ.** В проектных документах необходимо обосновать и выбрать такой тип регулятора (двухпозиционный, трехпозиционный, многопозиционный релейный регулятор, аналоговый, цифровой ПИД, самонастраивающийся регулятор), который при минимальной стоимости и максимальной надежности обеспечивал бы заданное качество регулирования технологического параметра (показатель колебательности, точность позиционирования, поддержания заданной температуры, уровня и т. п.).

*Для того, чтобы выбрать и обосновать выбор типа регулятора, определить его настройки необходимо знать:*

- статические и динамические характеристики объекта управления;
- требования к качеству процесса регулирования;
- характер возмущений, действующих на регулируемый процесс.

Выбор типа регулятора обычно начинается с простейших двухпозиционных релейных регуляторов и может заканчиваться самонастраивающимися микропроцессорными регуляторами.

*Примечание. Перед выбором закона регулирования необходимо уточнить сведения по объекту управления. Так, например, по требованиям технологического регламента некоторые объекты не допускают применения релейного управляющего воздействия.*

На этапе предварительных расчетов считается, что в системе с запаздыванием, минимальное время регулирования  $t_{p\min} = 2\tau$ .

Известно, что на динамику регулирования (в частности, на время регулирования  $t_p$ ) наибольшее влияние оказывает величина отношения запаздывания к постоянной времени объекта  $\tau/T$ . Эта величина часто характеризует собой степень трудности регулирования объекта.

При определении минимально возможного времени регулирования  $t_p$  для различных законов регулирования и типов регуляторов при их настройке можно руководствоваться рекомендациями для выбора закона регулирования, приведенными в таблице выбора регулятора (табл. 7).

В этой таблице приведены рекомендации, исходя из величины отношения запаздывания  $\tau$  к постоянной времени объекта  $T$ .

Если  $\tau/T < 0,2$ , то можно выбрать релейный, непрерывный или цифровой регуляторы.

Если  $0,2 < \tau/T < 1$ , то рекомендуется непрерывный или цифровой ПИ-, ПД-, ПИД-регулятор.

Если  $\tau/T > 1$ , то выбирают специальный цифровой регулятор с упреждением, который компенсирует запаздывание в контуре управления. Однако этот же регулятор рекомендуется применять и при меньших отношениях  $\tau/T$ .

Таблица 7

Таблица выбора регулятора

Пределы отношения $\tau/T$	Соотношение $t_p/\tau$	Характеристика объекта		Закон регулирования и тип регулятора
		по запаздыванию и инерционности	по степени регулируемости	
$0 < \tau/T < 0,05$		Без запаздывания	Очень хорошо регулируемый	Релейный, непрерывный П-, ПИ-, ПД-, ПИД-регулятор
$0,05 < \tau/T < 0,1$		С большой инерционностью и с малым запаздыванием	Очень хорошо регулируемый	Релейный, непрерывный П-, ПИ-, ПД-, ПИД-регулятор
$0,1 < \tau/T < 0,2$		С существенным транспортным запаздыванием	Хорошо регулируемый	Релейный, непрерывный П-, ПИ-, ПД-, ПИД-регулятор
$0,2 < \tau/T < 0,4$		С существенным транспортным запаздыванием	Еще регулируемый	Непрерывный или цифровой ПИ-, ПД-, ПИД-регулятор



Пределы отношения $\tau/T$	Соотношение $t_p/\tau$	Характеристика объекта		Закон регулирования и тип регулятора
		по запаздыванию и инерционности	по степени регулируемости	
$0,4 < \tau/T < 0,8$		С существенным транспортным запаздыванием	Трудно регулируемый	Непрерывный или цифровой ПИ-, ПД-, ПИД-регулятор
$0,8 < \tau/T < 1$		С большим транспортным запаздыванием	Очень трудно регулируемый	Непрерывный или цифровой ПИ-, ПД-, ПИД-регулятор
$\tau/T > 1$		С большим транспортным запаздыванием	Очень трудно регулируемый	Цифровой регулятор с упредителем
	$t_p/\tau \geq 6,5$			Непрерывный или цифровой П-регулятор
	$t_p/\tau \geq 12$			Непрерывный или цифровой ПИ-регулятор
	$t_p/\tau \geq 7$			Непрерывный или цифровой ПИД-регулятор

Существуют объекты с самовыравниванием и объекты без самовыравнивания. Объекты регулирования с отношением  $t_p/\tau < 0,2$  устойчивы и обладают самовыравниванием.

Примером объекта без самовыравнивания является вентилятор с асинхронным электродвигателем с жесткой характеристикой. При изменении напряжения питания двигатель или находится в заторможенном состоянии, или разгоняется до номинальных оборотов.

На параметры объекта (в частности, на величину запаздывания) значительное влияние оказывает взаимное расположение исполнительных органов (например, нагревательного элемента) и первичного преобразователя (датчика). Наличие запаздывания объекта резко ухудшает динамику замкнутой системы.

Для каждого объекта управления необходимо применять регуляторы с соответствующим алгоритмом и законом регулирования.

В ПИД-алгоритмах наиболее часто используются П- ПИ- ПИД- законы регулирования.

**П-регулятор** – это пропорциональный регулятор.

Передаточная функция П-регулятора:  $W_{\text{П}}(s) = K_1$ .

Принцип действия заключается в том, что регулятор вырабатывает управляющее воздействие на объект пропорционально величине ошибки (чем больше ошибка  $E$ , тем больше управляющее воздействие  $Y$ ).

Исходя из соотношения  $t_p/t_r$ , наибольшее быстродействие обеспечивает П-закон регулирования. Однако, если коэффициент усиления П-регулятора  $K_1$  окажется небольшим (чаще всего это наблюдается в системах с запаздыванием), то такой регулятор не обеспечивает высокой точности регулирования, так как в этом случае велика величина статической ошибки.

Если  $K_1 \geq 10$ , то П-регулятор приемлем, а если  $K_1 < 10$ , то рекомендуется введение в закон управления интегральной составляющей.

**ПИ-регулятор** – это пропорционально-интегральный регулятор. Он представляет собой сочетание П- и И-регуляторов.

Передаточная функция ПИ-регулятора:  $W_{\text{ПИ}}(s) = K_1 + K_2 / s$ .

Наиболее распространенным на практике является ПИ-регулятор. Он обладает следующими достоинствами:

- 1) обеспечивает нулевую статическую ошибку регулирования;
- 2) достаточно прост в настройке, т. к. настраиваются только два параметра, а именно коэффициент усиления  $K_1$  и постоянная времени интегрирования  $T_i = 1/K_2$ . В таком регуляторе имеется возможность оптимизации величины отношения  $K_1/T_i \rightarrow \min$ , что обеспечивает управление с минимально возможной среднеквадратичной ошибкой регулирования;
- 3) обладает малой чувствительностью к шумам в канале измерения (в отличие от ПД-регулятора).

**ПД-регулятор** – это пропорционально-дифференциальный регулятор.

Передаточная функция ПД-регулятора:  $W_{\text{ПД}}(s) = K_1 + K_3 s$ .

Этот закон часто применяется при наличии датчика скорости параметра регулирования. Он может обеспечить высокое быстродействие и достаточно малый показатель колебательности. Однако с увеличением запаздывания в системе резко возрастают отрицательные фазовые сдвиги, что снижает эффект действия дифференциальной составляющей регулятора.

**ПИД-регулятор** – это пропорционально-интегрально-дифференциальный регулятор. Он представляет собой сочетание П-, И- и Д-регуляторов.

Передаточная функция ПИД-регулятора:  $W_{\text{ПИД}}(s) = K_1 + K_2 / s + K_3 s$ .

Этот регулятор используется довольно часто, поскольку он сочетает в себе достоинства всех трех типовых регуляторов. Однако следует учитывать то, что эти достоинства реализуются только при его оптимальных настройках, когда настраиваются все три параметра  $K_1$ ,  $K_2$  и  $K_3$ .

С увеличением запаздывания, также как и при использовании ПД закона регулирования, в системе резко возрастают отрицательные фазовые сдвиги, что снижает эффект действия дифференциальной составляющей регулятора.

Кроме этого, наличие шумов в канале измерения в системе с ПИД-регулятором приводит к значительным случайным колебаниям управляющего сигнала регулятора, что увеличивает дисперсию ошибки регулирования и износ исполнительного механизма.

Таким образом, ПИД-регулятор следует выбирать для систем регулирования с относительно малым уровнем шумов и величиной запаздывания в объекте управления.

ПИД-регуляторы позволяют для объектов с малым транспортным запаздыванием  $\tau < 0,2T$  обеспечить хорошее качество регулирования, достаточно малое время выхода на режим и невысокую чувствительность к внешним возмущениям. Иногда (в объектах регулирования с существенным транспортным запаздыванием) при  $\tau > 0,2T$  ПИД-регулятор обладает плохим качеством регулирования. Следует иметь в виду также то, что при неточном задании коэффициентов настройки ПИД-регулятор может иметь худшие показатели, чем двухпозиционный релейный регулятор и даже перейти в режим автоколебаний. Для типовых П-, ПИ-, ПИД-регуляторов известны простейшие аналитические и табличные методы настройки.

В пояснительной записке рекомендуется этот раздел завершить выбором коэффициентов регулятора. Для этого можно воспользоваться эмпирическими формулами методики Цидлера «Настройка по реакции на входной скачок» [12].

### 13. АЛГОРИТМИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ УПРАВЛЕНИЯ ОБСЛУЖИВАНИЕМ ОБОРУДОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА

Каждая из восьми функций MES (раздел 5) реализуется на основе своих специфических правил. С точки зрения программной среды АСУ ПП логику можно представить следующим образом (рис. 27).

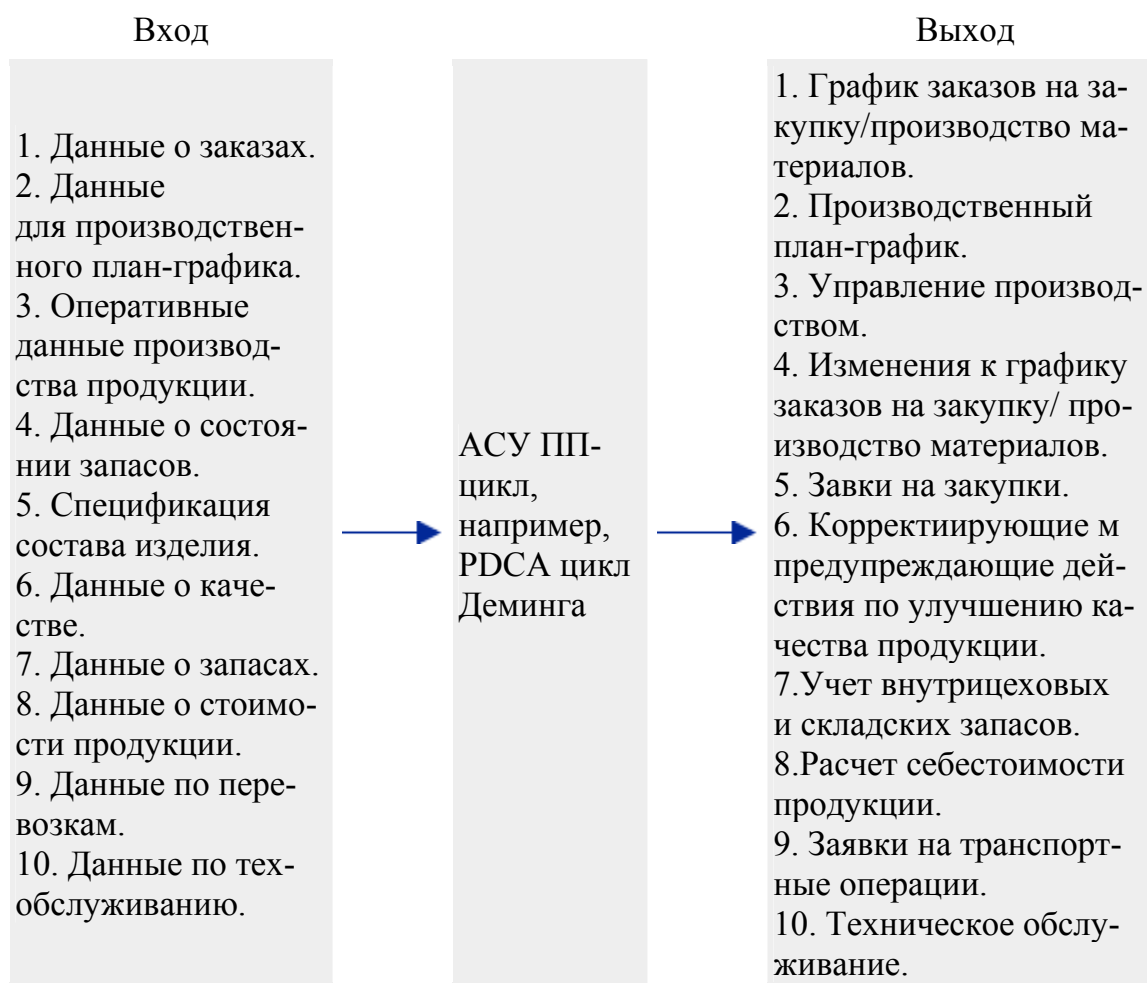


Рис. 27. Типовой алгоритм управления производственным процессом

Как и всякая компьютерная система, АСУ ПП обменивается с окружающей средой входной и выходной информацией [12]:

В соответствии с приведенным на рис. 27 алгоритмом для реализации управления требуются следующие основные данные.

*Основной производственный план-график* (объемно-календарный план, Master Production Schedule – MPS) – документ, в котором расписа-

но, сколько единиц продукции будет производиться в каждый плановый период отрезка планирования.

*Данные о состоянии запасов* (книга учета запасов, Inventory Status File) – документ, максимально полно раскрывающий информацию о каждой учетной единице сырья, материалов, полуфабрикатов, конечной продукции, включающую:

- общее описание – идентифицирующий код, характеристику, размер, вес и пр.;
- данные о запасах: единица запаса, расположение, размер запаса, статус (например, находится в цехе, на складе, в текущих заказах), оптимальный запас, страховой запас и пр.;
- данные по закупкам и продажам для сырья, материалов и полуфабриката: единица закупки/продажи, основные поставщики/покупатели, цена, время доставки, реквизиты поставщиков/покупателей, дополнительная информация (например, возможные задержки поставок);
- данные по производству для полуфабрикатов и конечной продукции: размер поставки, длительность производственного цикла.

*Спецификация состава изделия* (Bill of Materials File – BOM) – документ, содержащий:

- перечень сырья, материалов и полуфабрикатов, необходимых для производства продукции, с указанием нормативов по их использованию;
- иерархическое описание структуры продукции;
- результатами работы АСУПП-модуля являются следующие документы.

*График заказов на закупку/производство материалов и комплектующих* (Planned Order Schedule) – документ, расписывающий, какое количество сырья и материалов должно быть заказано (запланировано) в каждый плановый период в течение срока планирования. Этот документ определяет внутривыпускной план производства полуфабрикатов и план внешних закупок.

*Изменения к графику заказов на закупку/производство материалов и полуфабрикатов* (Changes in planned orders) – документ, содержащий корректировки ранее спланированных заказов на закупку/производство материалов и полуфабрикатов.

Часто входные и выходные данные АСУПП-модуля представляются в виде таблиц базы данных (ER-моделей).

Собственно АСУПП-цикл состоит из следующих шагов.

1. Составляется таблица общих потребностей в материалах и полуфабрикатах. Последовательность ее создания такова.

Древовидная структура состава продукции разворачивается в линейный список материалов и полуфабрикатов:

- узловые элементы различных уровней подготовки продукции кодируются (корневому элементу присваивается код 0, элементам самого верхнего уровня сборки – код 1 и т. д. по уровням);
- если некоторый элемент встречается на различных уровнях, ему присваивается код самого нижнего из этих уровней (и, таким образом, в линейном списке этот элемент встретится только один раз);
- разузлование состава продукции происходит последовательно по уровням – сначала обрабатывается уровень 0, затем уровень 1 и так далее.

2. Из книги учета запасов в расчетную программу переносятся данные о материалах и полуфабрикатах, необходимых для производства готовой продукции, и, в частности, данные о времени выполнения заказа на их поставку/производство.

3. Туда же переносятся плановые показатели выпуска конечного изделия из основного план-графика производства.

4. По каждому материалу и узлу для каждого планового периода рассчитывается общая производственная потребность в этом материале/узле; при этом используются данные состава готовой продукции (количество каждого материала/узла, необходимое для производства готовой продукции или промежуточного узла) и информация о времени поставки/производства материалов и полуфабрикатов.

Другой группой задач АСУ ПП является оперативное диагностирование состояния технологического оборудования. В процессе выполнения заказов с помощью технического диагностирования определяют его состояние (допустимое, предаварийное, аварийное состояния, соотнесенные зонам С, В и А карты Шухарта) и осуществляют поиск неисправности. Число состояний, различаемых в результате поиска неисправности, определяется глубиной поиска дефекта и требуемой достоверностью результатов диагностирования. Глубина поиска задается указанием элементов системы, с точностью, до которых определяют место неисправности. Достоверность результатов диагностирования – степень соответствия состояния, оцененного по этим результатам, истинному состоянию системы. Количественно достоверность характеризуется вероятностью совпадения оцененного и истинного состояний.

Результаты диагноза используют при прогнозе развития событий и поиске причин отказов, аварий и т. п. В первом случае предсказывают (прогнозируют) состояние системы, в котором она может оказаться в некоторый будущий момент времени. Например, реактор в настоящий момент находится в предаварийном состоянии; определяются его воз-

возможные переходы в другие состояния, и в первую очередь в аварийные. Во втором случае восстанавливают состояние, в котором система находилась в некоторый предшествующий момент времени. Это особенно важно при расследовании аварий, выявлении причин их возникновения. Определение состояний, предшествующих аварии, а, следовательно, и первопричины ее возникновения, исключительно важны для недопущения подобных аварий в будущем и на аналогичных системах. Использование методов технической диагностики позволяет сократить время простоя оборудования в ремонте до 30 %.

Алгоритм оперативного диагностирования может быть реализован с использованием критериев диагностики, приведенных в ГОСТ Р 50779 «Статметоды. Карты Шухарта».

Для детального анализа контрольных X-карт Шухарта используется метод анализа зон. Для этого область контрольной карты над центральной линией карты и под ней делится на три эквивалентные «зоны» (рис. 28). Эти зоны называют «сигмовыми» зонами, где  $\sigma$  – стандартное отклонение распределения выборочных средних. Каждой зоне приписывают вероятность нахождения в ней точек, наносимых на контрольную карту, в предположении нормального закона распределения. Если измерения контролируемого параметра имеют нормальное распределение, то около 68,26 % всех значений лежат в пределах  $\pm \sigma$  от центральной линии, около 95,44 % – в пределах  $\pm 2\sigma$  и около 99,73 % – в пределах  $\pm 3\sigma$ . Эти данные являются основой для принятия решений о возможностях техобслуживания.

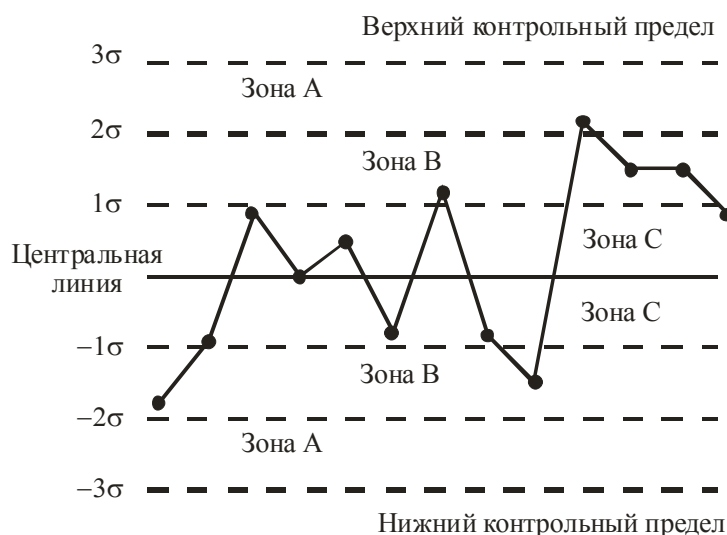


Рис. 28. Пример контрольной R-карты

В соответствии с этим алгоритмом считается, что риск того, что нанесенная на диаграмме точка, оказавшаяся вне контрольных преде-

лов, не соответствует действительности равен 0,3 % (или три на тысячу случаев). Другими словами, вероятность того, что нарушение контрольных пределов, в самом деле, случайное событие, а не реальный сигнал, считается столь малой, что при появлении точки вне пределов следует предпринимать определенные действия. Поэтому  $3\sigma$  контрольные пределы называют *границами действий*.

Пределы на контрольной карте, установленные на расстоянии  $2\sigma$  называют *предупреждающими*.

**Расчетные формулы:** Это скороговорка. Плохо!

$$\begin{aligned} \text{ВКП}_x &= \bar{\bar{X}} + A_2 \bar{R}. \\ \text{НКП}_x &= \bar{\bar{X}} - A_2 \bar{R}. \\ A_2 \bar{R} &= 3\sigma. \\ \text{ВКП}_R &= D_4 \bar{R}. \\ \text{НКП}_R &= D_3 \bar{R}, \end{aligned}$$

где  $A_2, D_3, D_4$ , выбираются из *таблицы исходных коэффициентов* (табл. 9).

Таблица 9

*Таблица исходных коэффициентов*

j	$A_2$	$D_3$	$D_4$	$d_2$
2	1,88	0	3,27	1,13
3	1,02	0	2,57	1,69
4	0,73	0	2,28	2,06
5	0,58	0	2,11	2,33
6	0,48	0	2,00	2,53

Размах  $R_i$  – это разность между наибольшим значением измерения и наименьшим в каждой выборке.

Выборочное среднее  $\bar{X}_i = (\sum_{j=1}^5 X_j) / j$ .

Среднее средних  $\bar{\bar{X}} = (\sum_{i=1}^{21} \bar{X}_i) / i$ .

Среднее размаха  $\bar{R} = (\sum_{i=1}^{21} R_i) / i$ .

Для выявления состояния оборудования на карте Шухарта должны быть построены графики (прямые  $\text{ВКП}_x, \text{НКП}_x, +\sigma, -\sigma, +2\sigma, -2\sigma, \bar{\bar{X}}$ , параллельные оси абсцисс) и  $\bar{X}$  (всего  $i$  точек).



Согласно ГОСТ для интерпретации хода процесса по карте Шухарта используются восемь критериев, каждый из которых должен быть проверен.

1. Проверка наличия точек (точки) на карте за контрольными пределами (рис. 29).

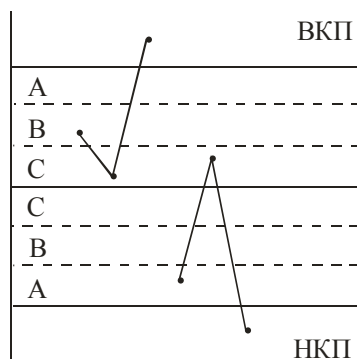


Рис. 29. Критерий 1

Наличие одной или большего числа точек за контрольными пределами – первый признак отсутствия управляемого состояния в этой точке. Поскольку точки вне контрольных пределов крайне редки, то следует предположить, что данная точка указывает на наличие особой причины (например, аварийное состояния подшипника узла газоперекачивающего насоса).

2. Наблюдение 9 точек подряд в зоне С по одну сторону от центральной линии (рис. 30).

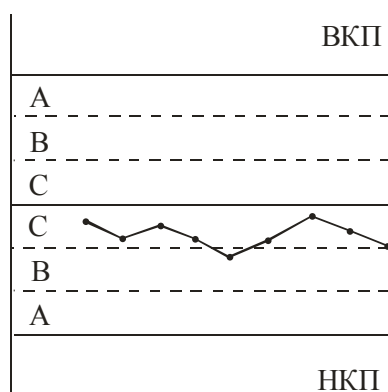


Рис. 30. Критерий 2

Если этот критерий выполняется, то делается вывод о возможном изменении среднего значения процесса в целом и таким образом о появлении системной причины смещения измерений, требующей устранения.

3. Наблюдение 6 точек монотонного роста или снижения, расположенные подряд (рис. 31).

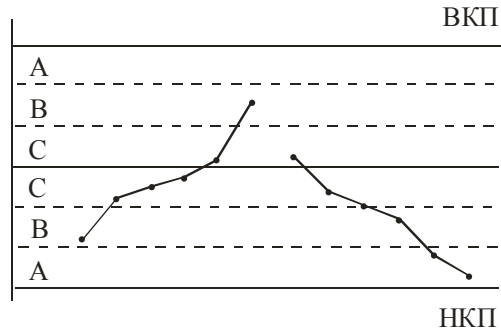


Рис. 31. Критерий 3

Часто такой сдвиг обусловлен изнашиванием инструмента, ухудшением технического обслуживания оборудования, изменением квалификации рабочего и т. п.

4. Наблюдение 14 точек подряд в «шахматном» порядке (через одну над и под центральной линией) (рис. 32).

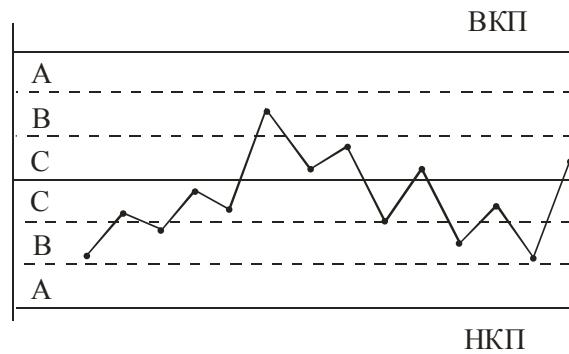


Рис. 32. Критерий 4

Если критерий 4, как это показано рис. 32, выполняется, то это указывает на действие двух систематически изменяющихся причин, например, попеременное действие двух альтернативных технологических единиц.

5. Наблюдение 2-х из 3-х расположенных подряд точек в зоне А (рис. 33).

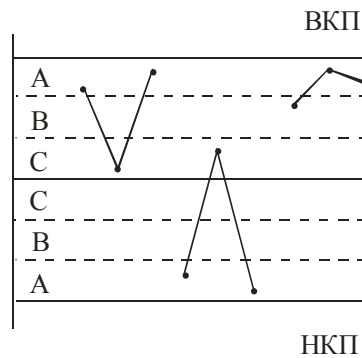


Рис. 33. Критерий 5

Этот критерий служит «ранним предупреждением» о начинающемся нарушении процесса (предаварийное состояние технологического оборудования).

6. *Наблюдение 4-х из 5-ти расположенных подряд точек в зоне В* (рис. 34).

Как и предыдущий, этот критерий может рассматриваться в качестве индикатора – «раннего предупреждения» о возможном нарушении процесса.

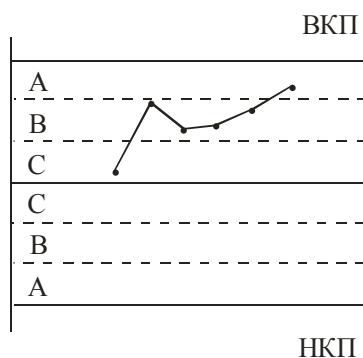


Рис. 34. Критерий 6

7. *Наблюдение 15 точек подряд в зоне С по обе стороны от центральной линии* (рис. 35).

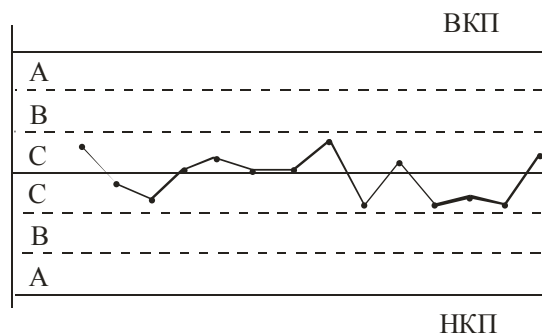


Рис. 35. Критерий 7

Выполнение этого критерия указывает на наличие системной ошибки контроля («грубые» измерения, несогласованная метрология ПИП с системой диагностирования).

8. *Наблюдение 8 последовательных точек по обеим сторонам центральной линии и ни одной в зоне С* (рис. 36).

Этот критерий указывает на наступление предаварийного неустойчивого состояния оборудования.

Используя эти критерии, можно сделать оперативное заключение о возможном состоянии (прогнозе состояния) технологического оборудования.

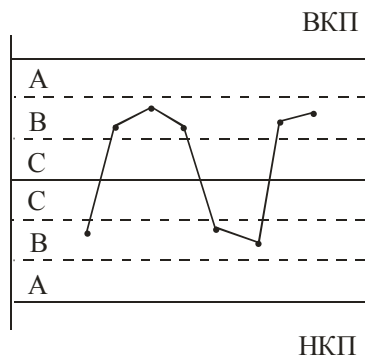


Рис. 36. Критерий 8

При анализе проблем состояния оборудования своевременность важна как с точки зрения минимизации производства несоответствующей продукции, так и получения обоснованных фактов для установления причин. Записи о работе процесса, которые оператор обязан периодически вносить в формуляр контрольной карты, являются важным источником информации для идентификации особых причин.

Одной из принципиальных сложностей построения автоматизированных диспетчерских систем, ориентированных на распознавание начальных форм нарушений процесса производства, является их начальная размытость и неопределенность результатов контроля. Размытость выражается в плавных сдвигах характеристической кривой, их транзиторном и (во многих случаях) обратимом характере, в постепенном переходе из более легких стадий нарушения в более тяжелые. Неопределенность результатов контроля характерна для любых методов контроля и надежности, основанных на технических экспериментах, измерениях, анализе, испытаниях. Она обусловлена конечной точностью приборов и методов измерений, вариациями условий контроля и контрольными испытаниями, особенностями персонала, осуществляющего контроль, разбросом данных при выборочных методах контроля и др. факторами. Поэтому в настоящее время особую актуальность приобретают системы, предназначенные для поддержки процессов принятия решений, в частности, советующие и экспертные системы. Назначение этих систем – «выдавать» по запросу пользователя советы по поведению в складывающейся на анализируемом объекте ситуации, причем делать это на уровне опытного человека, авторитета в своей области.

Советующая система не предназначена для замены человека – оператора, принимающего решения (хотя в экстренных случаях такая замена возможна при наличии надежного интерфейса с объектом управления). Рекомендации пользователю выдаются с экрана монитора. Форма выдачи не должна быть навязчивой, за исключением аварийных сигналов. Право выбора конкретного решения остается за оператором.

## **14. РАЗРАБОТКА ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ДЛЯ ПРОГРАММИРУЕМЫХ ЛОГИЧЕСКИХ КОНТРОЛЛЕРОВ**

Как только сформулирована задача программирования логики контроллера, то сразу встает вопрос о соответствующем программном инструментарии для решения этой задачи. Использование средств традиционного программирования (Си, Паскаль, Фортран, Бейсик и т. п.) дает решение задачи, но требует при этом обязательных знаний в теории программирования, знаний особенностей конкретной операционной системы и тонкостей аппаратного обеспечения (контроллеров, модулей сопряжения с объектом и т. п.).

Международная Электротехническая Комиссия (МЭК) предлагает использовать для этих целей стандарт IEC 1131-3, который определяет пять языков программирования логических контроллеров (PLC). Этот стандарт имеет очевидные преимущества, а именно: получение качественного программного продукта, сопрягаемость отдельных программных подсистем на уровне исходных текстов, независимость от типа операционной системы и от конкретной персоны программиста, появление общего языка общения в среде разработчиков прикладного программного обеспечения (ППО) и, наконец, самое важное – значительное сокращение времени разработки ППО и, как следствие, сокращение финансовых затрат на разработку проектов в целом.

Для специалистов КИПиА наиболее понятен язык LD-релейных диаграмм (Ladder Diagrams). Программа контроллера, написанная на этом языке, представляет собой релейную диаграмму в виде двух вертикальных «шин питания», между которыми располагают горизонтальные цепи, образованные контактами и обмотками реле. Количество контактов в цепи произвольно, реле одно.

Так в примере (рис. 37), если последовательно соединенные контакты замыкаются, то ток идет по цепи и реле Lamp включается.

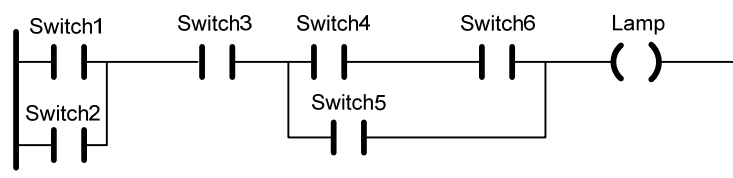
При необходимости можно включить параллельно несколько реле, их последовательное включение не допускается.

В LD-диаграммах каждому контакту ставится в соответствие логическая переменная, определяющая его состояние. Если контакт замкнут, то логическая переменная (например, дискретный сигнал «АВАР») имеет значение ИСТИНА. Если разомкнут – ЛОЖЬ. Имя переменной пишется

над контактом и фактически служит его названием. Так в примере Switch1 может иметь имя «больше  $T_{max}$ », Switch2– «больше  $P_{max}$ » и т. п.

Последовательное соединение контактов или цепей равноценно операции И. Параллельное соединение образует ИЛИ.

Цепь между «шинами» может быть либо замкнутой (ON), либо разомкнутой OFF. Это в свою очередь отражается на обмотке реле и соответственно на значении логической переменной (ИСТИНА/ЛОЖЬ).



LD	ЕСКД	Обозначение
		Нормально разомкнутый контакт
		Нормально замкнутый контакт
( )		Обмотка реле

Рис. 37. LD программа и соответствие ее операционных символов ЕСКД

Приведенная на рис. 37 схема эквивалентна выражению

Lamp:= (Switch1 OR Switch2) AND Switch3AND ((Switch4AND Switch6) OR Switch5).

## 15. РАЗРАБОТКА ИНФОРМАЦИОННОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ

Схема информационных потоков в ИКСУ может быть представлена в виде, показанном на рис. 38.

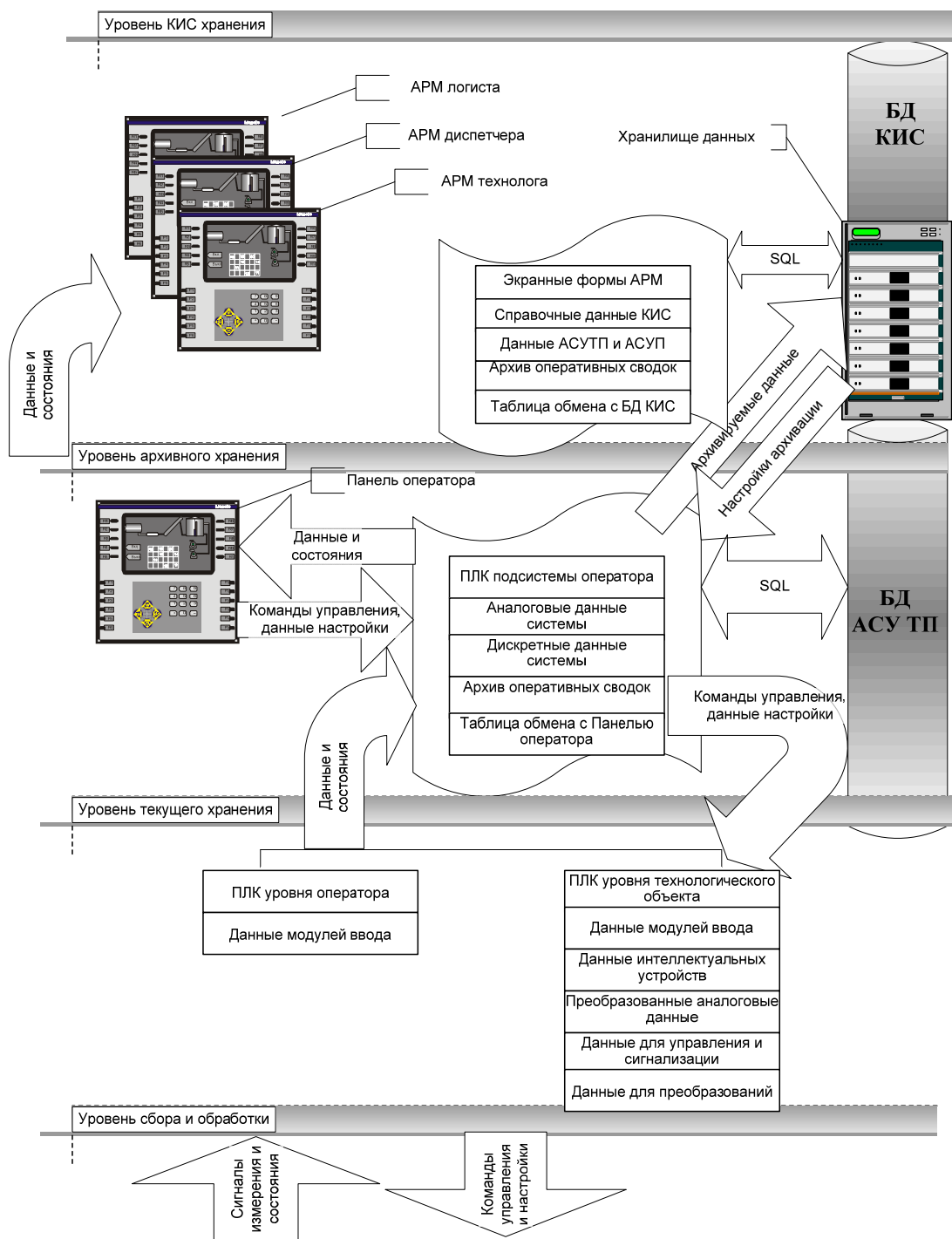


Рис. 38. Схема информационных потоков в ИКСУ

Здесь выделены основные уровни хранения информации в ИКСУ. На верхнем уровне информация поступает из БД КИС и БД АСУ ТП. Эта информация структурируется наборами экранных форм АРМ. Экранные формы должны быть сориентированы на информационные потребности конкретных пользователей (логистов, технологов, мастеров и т. п.). Информационная система сохраняет историю изменений технологических параметров для сигналов, с заранее определенной детальностью, например:

- все поступающие события – за 3 месяца;
- сжатую историю – за 6 месяцев;
- события – все в течение 6 месяцев.

Сохранение данных в базе данных происходит при помощи модуля истории. Данные, хранящиеся более 3 месяцев, прореживаются для обеспечения необходимой дискретности.

Буферная база данных между КИС и АСУ ТП является как приемником, запрашивающим данные от внешних систем, так и их пассивным источником. Можно сказать, что она выполняет роль маршрутизатора информационных потоков от систем автоматики и телемеханики к графическим АРМ-приложениям, системам коммерческого учета и планирования производства КИС. При этом возникают общие для систем хранения и обработки информационных данных задачи: выполнение функциональных операций; поддержание целостности и эквивалентности данных, а также специализированные – взаимодействие с подсистемой информационного обмена и т. п.

Для решения этих задач на проектном этапе выполнения работ широко применяются модели данных. Цель построения модели заключается в представлении данных в понятном виде. АСУ среднего размера может насчитывать сотни, тысячи точек взаимодействия с техническим процессом. Для систематизации и уменьшения объема данных о процессе в проекте необходимо описать природу соответствующей информации. Обычно это измеряемые величины или бинарные входные-выходные данные типа «включено/выключено» или «норма/авария». База данных процесса придает однородность и структурированность хранимых данных.

Так проектируемая база данных для АСУ ТП должна содержать структуру для обработки, прежде всего, следующей информации:

- параметры всех датчиков и исполнительных механизмов;
- параметры для расчета производных величин;
- возможные события и соответствующие им реакции управляющих воздействий.

Для регуляризации этой информации в реляционной модели БД используются таблицы и поля записи. Поля записей должна содержать:

- код источника информации;



- название/описание источника информации;
- тип;
- адрес (канал/сообщение);
- код события;
- код аварии;
- интервал выборки;
- первичное (необработанное значение контролируемого параметра);
- преобразованное значение.

Для преобразования первичной информации от объектов с аналоговыми сигналами в рабочие значения необходимы дополнительные параметры:

- масштабные коэффициенты;
- единицы измерения;
- минимальные/максимальные значения.

Эти поля в проекте должны быть сведены в таблицу типа табл. 10.

Таблица 10

*Таблица и поля записей источника информации АСУ ТП*

Имя поля	Значение	Комментарий
code	T439	Код
description	Primary circuit Temp.in	Описание (первичная цепь, входная температура)
type	AI	Тип: аналоговый сигнал
address	7_1_221	Адрес
Event code	0	Код события
Alarm code	3	Код аварий
Sample (sec0	30	Интервал выборки
Raw value	3228	Первичное значение
Converted value	78.8	Преобразованное значение °С
Alarm state	yes	Аварийное состояние
coefficient	0.0244	Коэффициент преобразования
units	°С	Единица измерения
min	50.0	МИН значение
max	75.0	МАКС значение

В первой колонке таблицы указано имя поля. СУБД, применяемые в АСУ ТП, требуют, чтобы имя полей представлялось латинскими буквами. Каждое поле в зависимости от идентификатора имеет свое значение.

Код используется для однозначной идентификации объекта в БД. Он служит как ключ и указатель соответствующей записи.

Название (описание) – это мнемонический текст, который применяется для идентификации устройства при выводе на экран монитора.

Тип показывает, является ли объект входом или выходом и определяет характер информации (аналоговая, дискретная, счетчик и т. п.).

Адрес. Объект должен быть привязан к определенному входному каналу и позиции во входящих сообщениях от периферийных устройств. Это может означать 7 – канал, 1 – устройство, 221 – точка измерения.

Код события показывает, инициирует ли рассматриваемый объект запуск некоторой автоматизированной функции при изменении значения.

Код аварии показывает, должно ли некоторое состояние пониматься как аварийное. Код аварии структурируется для индикации степени серьезности аварийной ситуации.

Аварийные сообщения могут быть просто предупреждениями или могут указывать на нештатную ситуацию, требующую немедленного внимания и реакции.

Интервал выборки, масштабные коэффициенты, предельные и аварийные значения необходимы для первичной обработки сигналов.

Для расчета коэффициента преобразования можно использовать следующую методику. Если считать, что максимальное значение температуры равно 100 °С и этот сигнал преобразуется 12-разрядным АЦП, у которого 0 в двоичном исчислении соответствует 0 °С, а 100 °С соответствует 4095, то коэффициент пересчета будет равен  $100/4096 = 0.0244$ .

Абстрактное описание и отделение результатов измерений от методов, с помощью которых они получены, полезны в тех случаях, когда некоторые характеристики этих величин могут меняться. В результате нет необходимости модифицировать систему управления. Достаточно лишь переопределить параметры преобразования, хранящиеся в БД.

Производные величины. Для любой АСУ ТП идеальной является ситуация когда все параметры технологического процесса можно непосредственно измерять с помощью датчиков. На практике это часто бывает затруднительным или просто невозможно измерять некоторые из необходимых переменных. Поэтому в АСУ ТП могут вычисляться производные переменные на основе тех, которые измеряются непосредственно. Как только поступают новые данные хотя бы для нескольких измеряемых величин, производные величины необходимо пересчитывать заново.

Доступ к информации, содержащейся в БД, выполняется с помощью трех основных операций, которые могут комбинироваться операциями выбора, проекции и сортировки. Операция по извлечению информации из БД называется запросом. Обычно для каждой конкретной ситуации интерес может представлять лишь очень ограниченное число

выборки из БД. Поэтому заранее можно определить небольшой набор стандартных запросов. Такие запросы называются протоколами (это обычные запросы, в которых predeterminedены операции проекции и сортировки и перед запуском требуется указать только конкретные параметры). Примерами протоколов могут быть аварийные запросы. Они позволяют быстро фиксировать в специальном файле журнале аварий с указанием времени события. Другим протоколом является протокол технического обслуживания (замена изношенных инструментов, калибровка, контроль смазки и др.)

В общем случае основные этапы проектирования реляционной базы данных должны включать в себя:

- определение объектов (источников данных), которые должны быть в базе данных;
- выявление связей между объектами;
- определение основных свойств объектов;
- определение отношений между таблицами базы данных, на основе связей между объектами данных, содержащимися в них;
- определение операций, выполняемых при создании и изменении информации в таблицах, включая обеспечение целостности данных;
- учет вопросов безопасности – какие полномочия и каким пользователям предоставлять;
- разработка процедур создания резервных копий и восстановления исходных файлов;
- представленный список позволяет составить представление о тех действиях, которые необходимо выполнить.

Такое проектирование может осуществляться с использованием методологии IDEF1x. При использовании этой методологии на начальной стадии проекта разрабатывается ERD-модель (диаграмма зависимостей сущностей). Задачей этой модели является обзор требований к информации ИКСУ, достаточной для начальной разработки ее информационного обеспечения. Эта модель не является очень детализированной (в нее включены только основные сущности), и атрибуты представляются на концептуальном представлении. Одним словом, ERD является презентационной моделью, удобной для обсуждения.

ERD-модель состоит из трех основных блоков: сущностей, атрибутов и связей. Если рассматривать диаграмму как некий графический язык, то можно заметить, что объекты являются существительными, атрибуты – прилагательными, а зависимости (связь, отношения) – глаголами этого языка. Построение модели данных в ERD-нотации заключается в нахождении правильного набора существительных, глаголов и прилагательных и в правильном их сочетании.

Сущность изображается на ER-диаграмме (ППП MS Visio) в виде прямоугольника, в верхней части которого приводится ее название и далее следует список атрибутов. Ключевые атрибуты могут быть выделены подчеркиванием или иным способом. Названия сущностей могут быть только в единственном числе, например, аналоговый канал ввода данных измерения, рабочий центр, продукт и т. д. Это делается для лучшей читаемости диаграммы. На рис. 39 представлена ER-диаграмма учета бобин (coil) проводов в кабельном производстве.

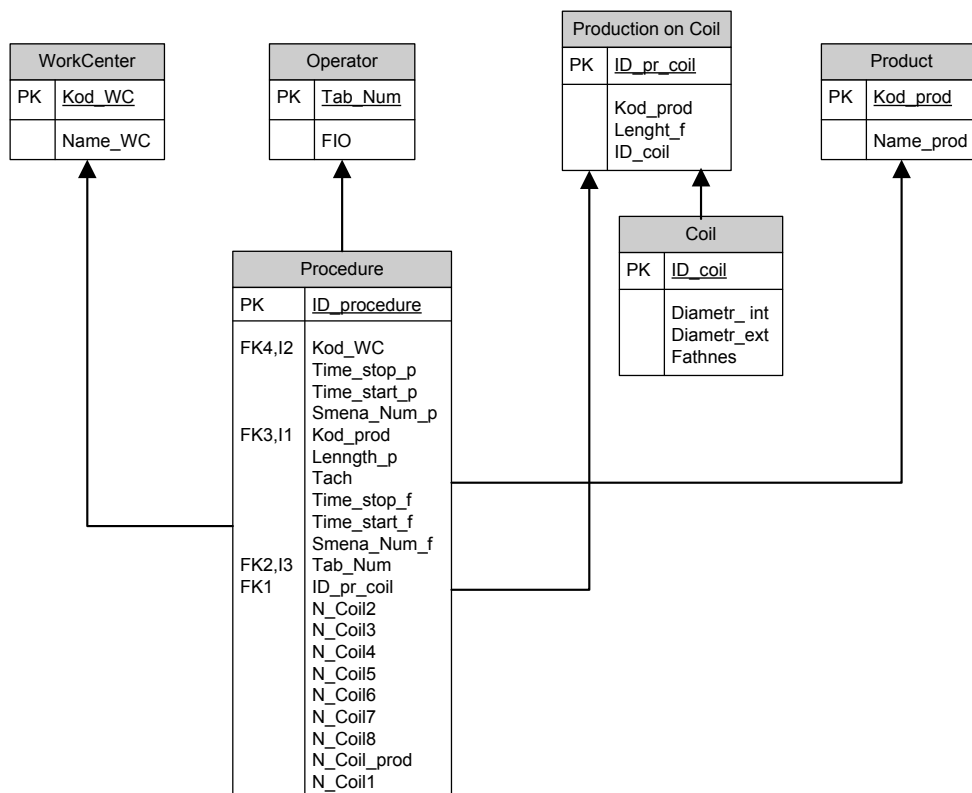


Рис. 39. Пример ER модели БД в кабельном производстве

**Связь** – ассоциирование двух или более сущностей. Если бы назначением базы данных было только хранение отдельных, не связанных между собой данных, то ее структура могла бы быть очень простой. Однако одно из основных требований к организации базы данных – это обеспечение возможности отыскания одних сущностей по значениям других, для чего необходимо установить между ними определенные связи. А так как в реальных базах данных нередко содержатся сотни или даже тысячи сущностей, то теоретически между ними может быть установлено более миллиона связей. Наличие такого множества связей и определяет сложность моделей БД.

Взаимосвязи между таблицами являются жизненно важными компонентами реляционных баз данных.

Эти связи создаются за счет использования общих ключевых атрибутов, т. е. записи в одной таблице ссылаются на записи в другой таблице. В ERD взаимосвязи отображены в виде линии между сущностями, входящими в модель. Связь между двумя сущностями также включает то, что факты одной сущности ссылаются или ассоциированы с фактами другой сущности.

Атрибуты, также как и сущности, должны быть четко определены. Используются те же правила – сравнивая объект с его определением, мы должны понять, подходит ли ему это определение. Определения атрибутов, в общем случае, должны иметь такую же базовую структуру, как и определения сущностей. Определения должны, где только возможно, содержать правила, определяющие возможные значения атрибутов. Правила для атрибутов сущности:

- каждый атрибут должен иметь уникальное имя;
- сущность может обладать любым количеством атрибутов;
- сущность может обладать любым количеством наследуемых атрибутов, но наследуемый атрибут должен быть частью первичного ключа сущности-родителя;
- для каждого экземпляра сущности должно существовать значение каждого его атрибута (правило необращения в нуль – Not Null);
- ни один из экземпляров сущности не может обладать более чем одним значением для ее атрибута.

Кроме описания БД в проекте должны быть описаны массивы документов. К входным документам и массивам относятся:

- материалы анализа выполнения годового плана предприятия за предыдущий год (поступает с ПЭО);
- перспективный план развития предприятия;
- план межотраслевых и ведомственных поставок на планируемый год;
- директивные документы;
- задания (поступают от вышестоящих организаций).

Массивы нормативно-справочной информации содержат:

- классификатор оборудования;
- классификатор готовой продукции;
- классификатор деталей и узлов собственного производства;
- массив поставщиков;
- производственные мощности предприятия;
- подетальные и поиздельные нормы расхода материалов;
- поиздельные нормы расхода комплектующих изделий;
- массив конструктивной применяемости;
- внутризаводские и оптовые цены на готовую продукцию;

- подетально-операционные нормативы трудозатрат;
- пооперационные нормы времени работы оборудования;
- действующие тарифные ставки для рабочих с повременной оплатой для рабочих-сдельщиков;
- номенклатуру-ценник на сырье;
- классификатор основных фондов;
- нормы амортизационных отчислений.

В состав выходных массивов документов входят:

- плановая потребность в производительных мощностях для групп оборудования;
- план производства валовой и товарной продукции в натуральном и денежном выражении;
- план реализации готовой продукции;
- плановая численность основных производственных рабочих в разрезе профессий;
- плановый фонд заработной платы;
- план по росту производительности труда;
- план-заявка потребности в материалах и комплектующих изделиях под годовую производственную программу;
- нормативные калькуляции и нормативная себестоимость;
- амортизационные отчисления и остаточная стоимость основных фондов;
- внутризаводские и оптовые цены на продукцию предприятия;
- план по прибыли и рентабельности.

## 17. РАЗРАБОТКА ЭКРАННЫХ ФОРМ ИКСУ

Производство продукции приводится в действие общими планами производства, которые затем спускаются на цеховой уровень, где по ним составляются детальные графики работы технологического оборудования, содержащие рабочие производственные задания, определяющие по времени технологические действия и события, возникающие при их выполнении. Экранные формы управления технологическими процессами обычно представляются мнемосхемами той или иной детализации. Мнемосхемы могут поддерживать функцию скроллинга.

В варианте дерева экранных форм (рис. 40) на уровне 1 осуществляется авторизованный вход в ИКСУ. На уровне 2 определяются задания и требования по выполнению технологических процессов. На уровне 3 осуществляется конкретизация информации для отдельных технологических (производственных) линий. Данные о состоянии оборудования и технологических процессов поступают в экранные формы на уровнях 4 и 5. На этих уровнях осуществляется конкретизация заданий, контроль и анализ эффективности производства.

При навигации экранных форм должна обеспечиваться передача информации между уровнями с единой системой адресации. В общем случае передаче подлежат следующие виды информации:

- оперативная информация о значениях технологических параметров, состоянии, загруженности оборудования;
- оперативная информация о заданиях, планах производства;
- оперативная информация об аварийных событиях;
- справочные сведения (ТУ, НД и др.).

Информация об оперативных значениях передается в соответствии со спецификацией OPC, причем передаче подлежат:

- канонические свойства OPC тега (имя тега, тип, значение, метка времени, достоверность);
- дополнительные свойства (максимально допустимое значение, минимально допустимое значение, мигание параметра и т. д.);
- определяемые пользователем свойства.

Канонические свойства передаются всегда, дополнительные и определяемые пользователем – по требованию (использованию в подсистеме отображения или иных системах и программах).

Подсистема межуровневой передачи данных может подключаться через ЛВС напрямую к нижестоящим уровням с использованием протокола TCP/IP. Цикл опроса получения информации настраивается адми-

нистратором ИКСУ. В ИКСУ поддерживается функция передачи информации на вышестоящий уровень как по изменениям, так и по запросам.

Подсистема передачи информации использует имена тегов для нахождения соответствующего источника информации.

В системе используется единая система именования технологических объектов, основанная на административной подчиненности и архитектуре технологических средств.

Система именования опирается на административную и технологическую иерархии и не должна зависеть от архитектуры и состава технических средств, используемых для доставки информации.

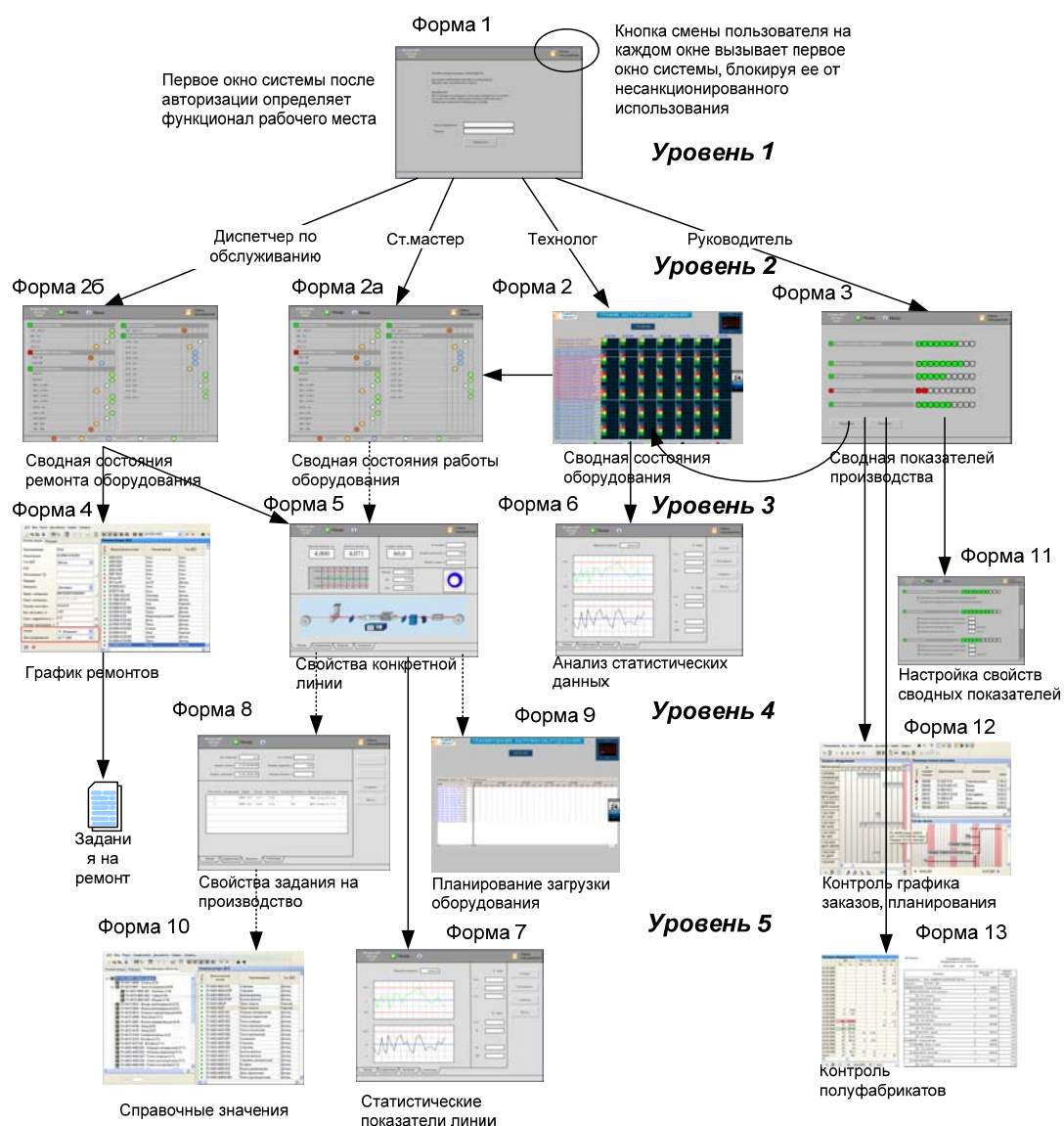


Рис. 40. Дерево экранных форм ИКСУ

В качестве примера на приведенном на рисунке (дереве экранных форм), каждая из форм позволяет выполнять следующие действия.



Форма № 1. Авторизация в системе. При входе требуется ввод пароля. Форма доступна из любой другой формы. Иконка блокировки расположена в правом верхнем углу. Изменение пользователя влечет за собой изменение функциональности АРМ и прав доступа к определенным функциям.

Формы № 2, 2а, 2б. Сводные состояния оборудования. Данные в формы поступают в реальном времени. Сводные состояния оборудования доступны в виде экранных форм по оборудованию, находящемуся в ремонте и(или) в работе, в зависимости от функциональности АРМ. На экран может выводиться список оборудования и индикация состояния. Каждый тип индикатора занимает определенное положение по горизонтали, облегчая чтение общей картины состояния оборудования. Заголовки групп оборудования имеют также индикацию общего состояния, которое используется в АРМ руководителя для укрупненного контроля работоспособности оборудования.

Форма № 3. Сводная показателей производства. В отличие от формы № 2 она содержит накопительные значения по состояниям. На этом экране доступен также режим просмотра состояний за предыдущие дни.

Форма № 4. График ремонтов. На этом экране представляется детализация конкретного оборудования, выбранного в форме № 2. Она позволяет производить необходимые записи для планирования нового ремонта и просмотра предыдущих ремонтов. Генерирует специальный отчет-наряд для персонала, который будет производить ремонт.

Форма № 5. Свойства конкретной линии. На этом экране также представляется детализация конкретного оборудования, выбранного в форме № 2. Эта форма показывает в режиме реального времени состояние оборудования. Для нее предусмотрены закладки (всплывающие окна), позволяющие просматривать данные в различных видах. Она позволяет управлять оборудованием. Свойства данной формы различны в зависимости от прав пользователя.

Форма № 6. Анализ статистических данных. Показывает статистику агрегированных данных в различных аналитических разрезах по всем линиям, любым группам датчиков и т. п.

Форма № 7. Статистические показатели линии. Используется для детализации конкретного оборудования, выбранного в форме № 2. Показывает статистику агрегированных данных в различных аналитических разрезах.

Форма № 8. Свойства задания на производство. Выводит детализацию задания конкретной линии. Она позволяет в зависимости от разрешений пользователя вмешиваться в порядок выполнения технологического процесса.

Форма № 9. Планирование загрузки оборудования. Выводит детализацию загрузки конкретного оборудования, в разрезе месячного календаря.

Форма № 10. Сводная показателей производства. Выводит в обзорном виде общие необходимые и достаточные показатели производства, необходимые руководству для оперативной оценки работы производства в реальном времени.

Форма № 11. Настройка сводных показателей. Позволяет настроить стратегию систематизации данных, которые будут визуализироваться в форме № 10.

Форма № 12. Контроль графика заказов, планирования. Позволяет руководителю просматривать и производить изменение в сетевом графике планирования заказов производства. Данные выводятся с помощью диаграммы Ганта, а также в табличном виде.

Форма № 13. Контроль полуфабрикатов. Визуализирует сводное состояние по складским запасам, а также предоставлять детальный отчет для производства сверки.

Экранные формы могут быть подготовлены как с помощью редактора экранных форм выбранной SCADA, так и с помощью графических редакторов. При разработке экранных форм следует руководствоваться отраслевыми требованиями. Следует обратить внимание на формат окна и цвета объектов мнемосхемы. Для динамических и двухпозиционных управлений в пояснительной записке необходимо описывать динамику их изменений.

## 18. ВЫБОР ИНТЕГРАЦИОННОЙ ПЛАТФОРМЫ САПР И АСУ

Современные САПР-технологии обеспечивают коллективный режим работы над проектом, когда одновременно большое число специалистов работает над различными частями и стадиями проекта. Основное отличие этих технологий разработки изделий машиностроения от традиционных заключается в том, что здесь в качестве главного результата конструирования и проектирования изделия выступает единая трёхмерная геометрическая модель объекта, а не комплект чертежей на бумажных носителях и набор спецификаций. При этом чертежи и спецификации также могут существовать как в виде электронных копий на машинных носителях, так и в виде твёрдой копии на бумаге, но они есть лишь слепок или копия с эталона. Интенсивное развитие компьютерных технологий привело к возможности совмещения этапов разработки и подготовки производства изделия. Это достигается следующими возможностями:

- наличием единой трехмерной геометрической модели;
- наличием развитого аппарата параметризации как при построении моделей отдельных деталей, так и при создании сборок;
- возможностью коллективной работы над данными проекта;
- вспомогательным характером этапа выпуска документации.

Современные программные средства САПР легко настраиваются на имеющийся станочный парк. Например, модуль создания управляющих программ для станков с ЧПУ позволяет создавать программы для любых станков, так как содержит встроенный генератор постпроцессоров. Он может легко адаптироваться к принятым на предприятии технологическим схемам, делая традиционный процесс менее трудоемким и более упорядоченным за счет связи с полной геометрической моделью.

Такие интегрированные САПР состоят из значительного количества (десятки и сотни) достаточно сложных взаимосвязанных программных продуктов, решающих следующие задачи:

- управление данными проекта;
- управление коллективной работой;
- геометрическое моделирование;
- выполнение инженерного анализа;
- изготовление комплекта чертежей;
- подготовка производства;
- выпуск сопутствующей документации.

Естественно, что эти программные комплексы являются очень дорогостоящими, и поэтому предприятие вынуждено останавливаться на какой-либо одной линии программных продуктов, используя компоненты конкурирующих технологий лишь для каких-то специфических целей, где их применение особенно эффективно. В соответствии с выбранным программным обеспечением и решаемыми задачами подбираются аппаратные средства. Как правило, в современных условиях это либо достаточно мощные персональные ЭВМ на базе многопроцессорных Intel-компьютерах, либо графические рабочие станции на RISC-процессорах (HP, SGI, SUN, DEC).

Одним из эффективных решений в данном направлении является технология Jupiter фирмы Intergraph, использующая, так называемое, композиционное программное обеспечение. Композиционное программное обеспечение – это просто система объединения программных модулей различного назначения и различных производителей.

Стандарт, на основе которого фирма Intergraph развивает компоненты программного обеспечения нового поколения – это Microsoft's Component Object Model (COM), который определяет двоичный стандарт для создания объектов и позволяет приложениям связываться друг с другом. Конечные пользователи видят результат как объект OLE (Object Linking and Embedding) или OLE4DM (OLE for Design and Modeling Applications). Последний является стандартом, который разработан фирмой Intergraph и представляет собой расширение OLE для работы с данными CAD/CAE/CAM и GIS.

Спецификация стандарта OLE4DM позволяет разработчикам программного обеспечения CAD/CAE/CAM и GIS создать такое программное обеспечение, которое помогает пользователям связывать и включать техническую графическую информацию в 2- и 3-мерные документы. При использовании OLE4DM техническая информация становится более доступной, чем когда-либо прежде, так как «живые» геометрические объекты интегрируются в файлы приложений и документы.

Технологии COM и OLE освобождают разработчиков от необходимости использовать общий формат данных в качестве основы для интеграции приложений. Вместо этого разработчики могут объединять через стандарты связи COM любые OLE-приложения – деловые, технические или производственные. Это позволяет техническим специалистам работать с объектами точно так же, как они работают в традиционных системах автоматизированного проектирования, но со многими дополнительными преимуществами (рис. 41).

Приложения, созданные на основе технологии Jupiter – это естественные Windows-приложения, ориентированные на конкретную предметную область («говорят на профессиональном языке пользовате-

ля») и независимые от традиционных систем CAD, и что очень важно, они предназначены не для замены, а для расширения возможностей существующих технологий.

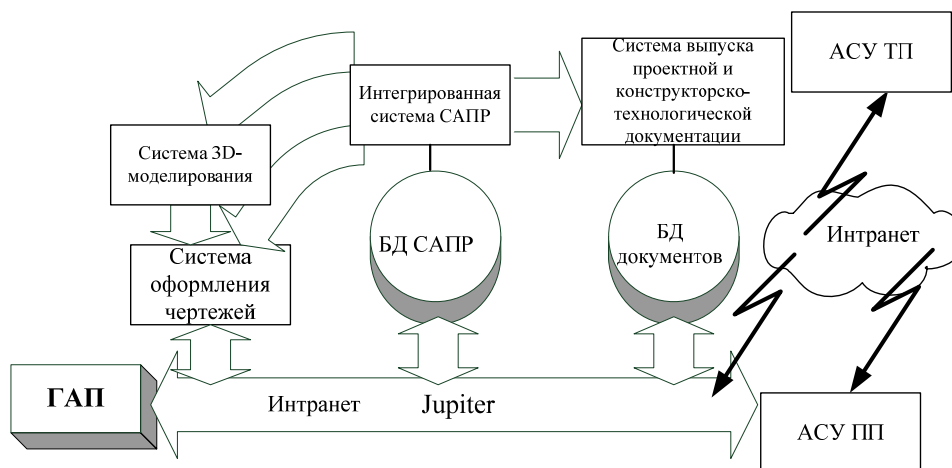


Рис. 41. Интеграция САПР и АСУ

Основные преимущества, которые предоставляет конечному пользователю стандарт фирмы Intergraph [], это:

- возможность приобретения специализированных решений для конкретных задач, которые не имеют избыточных (и часто совершенно не используемых) команд;
- новый уровень простоты в использовании, благодаря интерфейсу Windows;
- сохранение инвестиций, уже сделанных в существующие данные, обучение, аппаратные средства, программное обеспечение;
- возможность постепенного приобретения необходимых приложений;
- работа с программным обеспечением, которое говорит на профессиональном языке, а не на языке чертежа;
- повышение производительности, благодаря использованию объектов, которые функционируют как реальные 3-мерные объекты, а не элементы чертежа;
- улучшение характеристик программного обеспечения, потому что оно непосредственно использует преимущество аппаратных средств и ресурсов операционной системы;
- возможность использования стандартных средств разработки и настройки, таких как Visual Basic или Visual C++, вместо необходимости использовать специализированные средства систем CAD типа MDL или AutoLisp;
- улучшение и качества проекта, благодаря автоматизации документооборота.

## 19. ВЫБОР ЭЛЕКТРОПРИВОДНЫХ СРЕДСТВ АСУ

Для наиболее полного решения задачи комплексной автоматизации технологических и производственных процессов современные роботизированные участки и гибкие автоматизированные производства (ГАП) требуют модульного и однотипного выполнения элементов используемого электропривода при его максимальной конструктивной и функциональной интеграции с другими компонентами технологического оборудования.

Современный электропривод представляет собой конструктивное единство электромеханического преобразователя энергии (двигателя), силового преобразователя и устройства управления. Он обеспечивает преобразование электрической энергии в механическую в соответствии с алгоритмом работы технологической установки. Сфера применения электрического привода в промышленности, на транспорте и в быту постоянно расширяется. В настоящее время уже более 60 % всей вырабатываемой в мире электрической энергии потребляется электрическими двигателями. Следовательно, эффективность энергосберегающих технологий в значительной мере определяется эффективностью электропривода. Разработка высокопроизводительных, компактных и экономичных систем привода является приоритетным направлением развития современной техники.

Рост степени интеграции в микропроцессорной технике и переход от микропроцессоров к микроконтроллерам с встроенным набором специализированных периферийных устройств, сделали необратимой тенденцию массовой замены аналоговых систем управления приводами на системы прямого цифрового управления.

Под прямым цифровым управлением понимается не только непосредственное управление от микроконтроллера каждым ключом силового преобразователя (инвертора и управляемого выпрямителя, если он есть), но и обеспечение возможности прямого ввода в микроконтроллер сигналов различных обратных связей (независимо от типа сигнала: дискретный, аналоговый или импульсный) с последующей программно-аппаратной обработкой внутри микроконтроллера. Таким образом, система прямого цифрового управления ориентирована на отказ от значительного числа дополнительных интерфейсных плат и создание одноплатных контроллеров управления приводами. В пределах встроенная система управления проектируется как однокристалльная и вместе с силовым преобразователем и исполнительным двигателем кон-

структивно интегрируется в одно целое, так называемый, мехатронный модуль движения.

В автоматических системах управления и регулирования, промышленных роботах, станках с числовым программным управлением (ЧПУ), элементах робототехнических комплексов, различных технологических устройств значительное место занимают электрические приводы малой мощности постоянного и переменного тока.

При высокой степени определенности технологического процесса электропривод может строиться по замкнутой или разомкнутой структуре.

Основой любого электропривода является электрический двигатель. Исполнительный механизм привода должен преодолевать имеющуюся на выходном валу нагрузку и развивать скорости и ускорения, обеспечивающий слежение за входным управляющим воздействием.

Традиционный подход к созданию любой системы предусматривает последовательное выполнение ряда стадий ее проектирования и изготовления: разработку технического задания, эскизное и техническое проектирование, создание опытного (натурного) образца и апробацию на нем заложенных решений и т. д.

Однако для современных сложных электромеханических систем, в том числе и электрических приводов, такой путь становится неэффективным из-за больших сроков и денежных затрат. Решение проблемы находят в выборе принципиальных решений на этапе структурного (системного) анализа, который предшествует физическому созданию системы и выполняется на базе компьютерных средств с применением математических моделей [15].

Для большинства массовых применений приводов (насосы, вентиляторы, конвейеры, компрессоры и т. д.) требуется относительно небольшой диапазон регулирования скорости (до 1:10, 1:20) и относительно низкое быстродействие. При этом целесообразно использовать классические структуры скалярного управления. Переход к широкодиапазонным (до 1:10000), быстродействующим приводам станков, роботов и транспортных средств, требует применения более сложных структур векторного управления. Доля таких приводов составляет сейчас около 10 % от общего числа и постоянно растет.

В последнее время на базе систем векторного управления разработан ряд приводов с прямым цифровым управлением моментом. Отличительной особенностью этих решений является предельно высокое быстродействие контуров тока, реализованных, как правило, на базе цифровых релейных регуляторов или регуляторов, работающих на принципах нечеткой логики (фаззи-логики). Системы прямого цифрово-

го управления моментом ориентированы в первую очередь на транспорт, на использование в кранах, лифтах, робототехнике.

Усложнение структур управления приводами потребовало резкого увеличения производительности центрального процессора и перехода к специализированным процессорам с объектно-ориентированной системой команд, адаптированной к решению задач цифрового регулирования в реальном времени. Ряд фирм (Intel, Texas Instruments, Analog Devices и др.) выпустили на рынок новые микроконтроллеры для управления двигателями (из серии Motor Control) на базе процессоров для обработки сигналов DSP-микроконтроллеры. Они не только обеспечивают требуемую производительность центрального процессора (более 20 млн оп./сек.), но и содержат ряд встроенных периферийных устройств, предназначенных для оптимального сопряжения контроллера с инверторами и датчиками обратных связей. Среди встроенной периферии особое место занимают универсальные генераторы периодических сигналов, обеспечивающие самые современные алгоритмы управления инверторами, в частности, алгоритмы векторной широтно-импульсной модуляции [16].

Рост вычислительных возможностей встроенных систем управления приводами сопровождается расширением их функций. Кроме прямого цифрового управления силовым преобразователем реализуются дополнительные функции поддержки интерфейса с пользователем (через пульт оперативного управления), а также управления технологическим процессом.

В любой электромеханической системе имеется энергетический канал и канал управления. В энергетическом канале, элементами которого являются источник питания, промежуточный преобразователь энергии и исполнительный механизм, происходит преобразование энергии источника питания в механическую энергию движения выходного вала привода. Назначение канала управления состоит в обеспечении необходимого управления потоком энергии в энергетическом канале системы. Управление представляет собой процесс сбора, передачи и переработки информации. От элементов системы к управляющим устройствам поступает информация, характеризующая состояние элементов системы. Кроме того, поступает информация от вышестоящих органов управления и воздействий внешней среды. Управляющие устройства перерабатывают всю поступающую к ним информацию и в результате этой переработки синтезируют управляющие команды, которые изменяют состояние или режимы функционирования элементов системы.

Наличие в электроприводе двух каналов позволяет разбить на две группы почти все задачи, решаемые в процессе проектирования электромеханических систем.



Требования, предъявляемые к электроприводам, определяются для какого движения электропривода: главного движения, подачи или вспомогательного, так как именно это определяет мощность, момент и способ регулирования частоты вращения, диапазон регулирования, плавность регулирования, требования к динамическим характеристикам. Требования снижения шероховатости и повышения точности при механической обработке и позиционировании определяют требования по увеличению чувствительности и быстродействия информационно-измерительной системы и системы управления.

Проектирование системы управления электроприводом состоит из определения преобразовательной части, по выбранному электродвигателю, выбора трансформатора и коммутирующей аппаратуры, выбора схемы преобразователя и расчета его элементов, синтеза системы управления. Выбор перечисленных элементов производится, как правило, по каталогам.

### **Основные тенденции**

Анализ продукции ведущих мировых производителей систем привода и материалов опубликованных научных исследований в этой области позволяет отметить следующие ярко выраженные тенденции развития электропривода [16]:

- Неуклонно снижается доля систем привода с двигателями постоянного тока и увеличивается доля систем привода с двигателями переменного тока. Это связано с низкой надежностью механического коллектора и более высокой стоимостью коллекторных двигателей постоянного тока по сравнению с двигателями переменного тока. По прогнозам специалистов в начале следующего века доля приводов постоянного тока сократится до 10 % от общего числа приводов.
- Преимущественное применение в настоящее время имеют привода с короткозамкнутыми асинхронными двигателями. Большинство таких приводов (около 80 %) нерегулируемые. В связи с резким удешевлением статических преобразователей частоты доля частотно-регулируемых асинхронных электроприводов быстро увеличивается.
- Естественной альтернативой коллекторным приводам постоянного тока являются привода с вентильными, т. е. электронно-коммутируемыми двигателями. В качестве исполнительных бесколлекторных двигателей постоянного тока (БДПТ) преимущественное применение получили синхронные двигатели с возбуждением от постоянных магнитов или с электромагнитным возбуждением (для больших мощностей). Этот тип привода наиболее перспективен для станкостроения и робототехники, однако, яв-

ляется самым дорогостоящим. Некоторого снижения стоимости можно добиться при использовании синхронного реактивного двигателя в качестве исполнительного.

- Все шире используется привод на основе вентильно-индукторного двигателя (ВИД). Двигатели этого типа просты в изготовлении, технологичны и дешевы. Они имеют пассивный ферромагнитный ротор без каких-либо обмоток или магнитов. Вместе с тем, высокие потребительские свойства привода могут быть обеспечены только при применении мощной микропроцессорной системы управления в сочетании с современной силовой электроникой. Усилия многих разработчиков в мире сконцентрированы в этой области. Для типовых применений перспективны индукторные двигатели с самовозбуждением, а для тяговых приводов индукторные двигатели с независимым возбуждением со стороны статора. В последнем случае появляется возможность двухзонного регулирования скорости по аналогии с обычными приводами постоянного тока.

Наиболее простыми по устройству и надежными в эксплуатации являются асинхронные электродвигатели с короткозамкнутым ротором. Их масса в 1,5–2 раза меньше массы двигателя постоянного тока той же мощности. Однако система регулирования частоты вращения значительно сложнее, чем в электродвигателях постоянного тока и вентильных электродвигателях, так как требует одновременного регулирования амплитуды и частоты напряжения по определенному закону. Асинхронный электродвигатель допускает возможность регулирования с постоянной мощностью, что предопределяет целесообразность его применения в приводах главного движения.

В маломощных системах автоматики с цифровым управлением целесообразно использовать шаговые электродвигатели.

При выборе типа электродвигателя необходимо учитывать следующие факторы:

- ограничения, предопределяемые источником энергии и типом преобразователя;
- структуру и тип системы управления, а также требования к ее статическим и динамическим характеристикам;
- энергетические возможности электродвигателей выбираемого типа, так как серийные электродвигатели можно использовать лишь в определенном диапазоне мощностей, скоростей и ускорений;
- параметры, характеризующие внешние условия – механические, климатические, степени защиты и т. д.
- габаритные и весовые ограничения, эксплуатационные требования, надежность, экономичность;

Затем проводят расчет мощности электродвигателя и его выбор по каталогам. Выбор электродвигателя проводится в несколько этапов.

### Выбор электродвигателя

Выбор электродвигателя для электропривода различных электромеханических систем является одним из основных этапов проектирования системы. Это объясняется тем, что двигатель, с одной стороны, определяет тип, параметры и мощность предшествующих элементов системы: преобразователя, трансформатора и пускорегулирующей аппаратуры. С другой стороны, именно от двигателя зависят динамические качества системы, которые он должен обеспечить. Никакая система управления не может создать требуемый момент, частоту вращения, ускорение, если они не обеспечены электродвигателем. Кроме обеспечения динамических свойств электропривода при выборе двигателя следует учитывать диапазон регулирования скорости, вид требуемой механической характеристики, частоты включений приводного механизма, параметры окружающей среды. В зависимости от области применения электромеханические системы или объекты действия электроприводов подразделяют на наземные, морские, авиационные, космические или промышленные, со всеми вытекающими из этого особенностями [15].

**Выбор типа электродвигателя.** Двигатель выбирают по следующим показателям: роду тока, номинальному напряжению, мощности (или моменту), частоте вращения, жесткости механической характеристики, регулировочным свойствам, экономическим показателям, условиям эксплуатации. Стремятся выбрать электродвигатель наиболее простой в управлении, надежный, имеющий наименьшую массу, габариты и стоимость. Вместе с тем электродвигатель должен обеспечить выполнение всех функций системы.

**Предварительный выбор электродвигателя.** Предварительный расчет мощности электродвигателя для первого шага последовательных приближений осуществляется с помощью следующей зависимости

$$P_{\text{дв}} = \frac{1}{\eta_{\text{ред}}} \cdot M_{\text{мех}} \cdot \Omega_{\text{мех}} = \frac{1}{\eta_{\text{ред}}} \cdot k_y \cdot k_z \cdot M_{\text{ст.экв}} \cdot \Omega_{\text{мех}}, \quad (1)$$

где  $M_{\text{мех}}$ ,  $\Omega_{\text{мех}}$  – заданные момент и частота вращения механизма,  $k_y$  – коэффициент, учитывающий необходимость создания ускорений,  $k_z$  – коэффициент запаса, учитывающий возможность работы электродвигателя с повышенным моментом нагрузки,  $M_{\text{ст.экв}}$  – эквивалентный момент нагрузки, определяемый по диаграмме нагрузки,  $\eta_{\text{ред}}$  – коэффициент полезного действия передаточного механизма.

Рекомендуется принимать:  $k_y = 1,2 - 2,5$ ;  $k_3 = 1,1 - 1,3$ ;  $\eta_{ред} = 0,8 - 0,96$ . Часто принимают  $k_y k_3 = 2$ . Считают, что система получит оптимальное ускорение в том случае, когда на валу для преодоления момента нагрузки используется половина вращающего момента двигателя, а вторая половина затрачивается на преодоление момента инерции ротора с редуктором и нагрузкой:

$$M_{см экв} = \sqrt{\frac{1}{t_u} \cdot \sum M_{см j}^2 \cdot t_j}, \quad (2)$$

где  $M_{см j}$  – момент нагрузки на  $j$ -м участке нагрузочной диаграммы,  $t_j$  – длительность  $j$ -го участка нагрузочной диаграммы,  $t_u$  – длительность цикла нагрузочной диаграммы.

Пример нагрузочной диаграммы представлен на рис. 42.

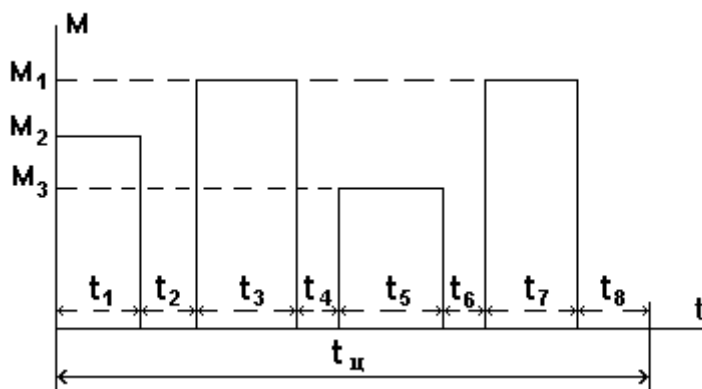


Рис. 42

По таблицам Электротехнического справочника, Справочника по элементам автоматического регулирования, Справочника по электрическим машинам или по заводским проспектам выбирается электродвигатель в первом приближении и фиксируются его технические данные: мощность, номинальный и пусковой моменты, частоту вращения, момент инерции ротора, массу.

**Уточненный выбор электродвигателя.** Выбрав по таблицам электродвигатель в первом приближении, сравниваем его технические данные с требуемыми для привода механизма. Практически всегда частота вращения электродвигателя оказывается во много раз больше частоты вращения вала механизма. Находим передаточное число механического редуктора

$$i_{ред} = \Omega_{об} / \Omega_{мех}.$$

По каталожным данным выбираем тип редуктора и уточняем  $i_{ред}$  и  $\eta_{ред}$ . Необходимо помнить, что механическая передача имеет удельный момент на один – два порядка выше, а волновые передачи на три порядка выше, чем у электродвигателя. Причем, изменение передаточного отношения механической передачи в несколько раз мало изменяет массу и габариты редуктора. В то же время высокоскоростные электродвигатели имеют меньшую массу. Поэтому критерием оптимальности выбора электродвигателя является не максимум удельного момента, а максимум удельной мощности.

Находим уточненное значение требуемого момента вращения электродвигателя

$$M = \sqrt{\left(\frac{M_{ст экв}}{i_{ред} \cdot \eta_{ред}}\right)^2 + \left(\frac{J_{мех}}{i_{ред}^2} + J_{дв} + J'_{ред}\right)^2} \cdot \varepsilon_{ред}^2 \cdot i_{ред}^2, \quad (3)$$

где  $J_{мех}$ ,  $J_{дв}$  – момент инерции вращающихся частей механизма и двигателя,  $J'_{ред}$  – момент инерции промежуточной ступени редуктора, приведенный к валу электродвигателя,  $\varepsilon_{ред}$  – допустимое ускорение вала нагрузки. Обычно принимают  $J'_{ред} = 0,05 - 0,25 J_{дв}$ .

Иногда рекомендуется находить требуемое значение момента электродвигателя как

$$M = \frac{M_{ст экв}}{i_{ред} \cdot \eta_{ред}} + \left(\frac{J_{мех}}{i_{ред}^2} + J_{дв} + J'_{ред}\right) \cdot \varepsilon_{ред}. \quad (4)$$

Номинальный момент электродвигателя не должен быть меньше найденного по (3). Допускается превышение номинального момента над расчетным по (3) в 1,15 – 1,4 раза. При больших расхождениях требуется выбор по таблицам другого электродвигателя.

Выбранный электродвигатель проверяется на перегрузочную способность, по условиям пуска, по нагреву. В системах автоматического регулирования, электроприводах роботов и станков с ЧПУ электродвигатели работают в кратковременном и повторно-кратковременном режиме. В кратковременном режиме нагрев двигателя не лимитирует его мощности. При повторно-кратковременном режиме момент электродвигателя должен быть больше или равен моменту, определяемому из условий тепловых потерь.

#### ***Особенности выбора электродвигателя промышленного робота.***

В процессе работы вследствие изменения конфигурации манипулятора, рис. 43, может сильно изменяться момент нагрузки на валу электродвигателя.

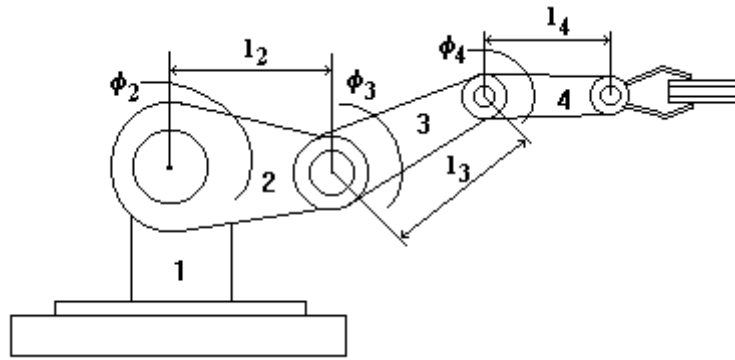


Рис. 43

Поэтому электродвигатель должен иметь хорошую перегрузочную способность, а схема управления должна обеспечить стабилизацию частоты вращения. С этой точки зрения целесообразно использовать электродвигатели постоянного тока или вентильные электродвигатели. Изменение момента инерции нагрузки, связанное с изменением конфигурации манипулятора, предъявляет жесткие требования к динамическим характеристикам электродвигателей. Наряду с электродвигателями классического исполнения находят применение двигатели с полым якорем и с дисковым якорем.

При работе промышленного робота недопустимы удары руки робота по обслуживаемому оборудованию. Это требует движения привода без перерегулирования, чтобы при подходе руки робота к заданному положению происходило торможение двигателя и в заданном положении угловая скорость двигателя была равна нулю.

Следует учесть параллельную работу нескольких преобразователей при контурном управлении роботом. Коммутационные процессы в преобразователе малой мощности не влияют на работу других более мощных преобразователей, тогда как коммутационные процессы мощного преобразователя будут оказывать влияние на работу маломощного электропривода и это необходимо учитывать.

**Особенности выбора электродвигателей привода подачи станков.** Рассмотрим расчет требуемой мощности двигателя для длительного режима работы. Кинематическая схема привода подачи станка представлена на рис. 44.

Усилие подачи по управляемой оси

$$F_n = k_p F_p + \mu F_{N\Sigma} + F_n, \quad (5)$$

где  $F_p$  – усилие резания вдоль оси,  $k_p$  – коэффициент запаса ( $k_p = 1,0 - 1,5$ ),  $F_{N\Sigma}$  – сумма нормальных сил, действующих на направляющие,  $\mu$  – коэффициент трения,  $F_n$  – сила от предварительного натяга, не учтенная в  $F_{N\Sigma}$ .

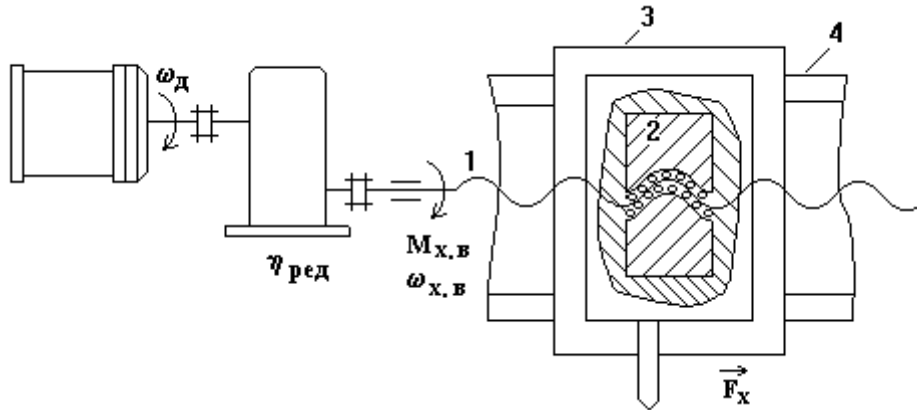


Рис.44. Кинематическая схема привода:  
 1 – ходовой винт, 2 – гайка, 3 – стол, 4 – направляющие

Мощность, приложенная к исполнительному механизму в режиме резания

$$P_{mx} = F_n v_{раб}, \quad (6)$$

где  $v_{раб}$  – максимальная скорость рабочей подачи.

Мощность, приложенная к исполнительному механизму в режиме движения на быстром ходу

$$P_{mx} = (\mu F_{N\Sigma} + F_n) v_{max}, \quad (7)$$

где  $v_{max}$  – скорость быстрого хода.

Для предварительного выбора типа электродвигателя необходимо знать тип механической передачи. В станках с ЧПУ при длине перемещения меньше 3...4 м используется передача винт – гайка качения, имеющая КПД в пределах 0,85...0,95. При больших длинах перемещения используется передача рейка – шестерня с суммарным КПД 0,8...0,9.

Предварительный выбор электродвигателя производится из условия

$$P_{ном} > P_{mx} / \eta. \quad (8)$$

Общее передаточное число между исполнительным механизмом и двигателем для передачи винт – гайка качения равно

$$i_p = 2 \pi v_{max} / (t_g \omega_{дв}), \quad (9)$$

где  $t_g$  – шаг винта,  $\omega_{дв}$  – угловая частота вращения вала электродвигателя.

Для передачи рейка – шестерня

$$i_p = v_{max} / (\pi D_{ш} \omega_{дв}), \quad (10)$$

где  $D_{ш}$  – диаметр выходной шестерни.

**Особенности выбора шагового электродвигателя.** При проектировании дискретного электропривода тип шагового электродвигателя выбирается по величине максимального синхронизирующего момента

$$M_{max} \geq 2,5 M_{ст.н} / i_{ред} \eta_{ред}. \quad (11)$$

Передаточное отношение редуктора выбирается из условия

$$\alpha / i_{ред} \leq \theta, \quad (12)$$

где  $\alpha$  – шаг двигателя,  $\theta$  – статическая погрешность позиционирования.

**Выбор конструктивного исполнения электродвигателя.** При выборе конструктивного исполнения двигателя прежде всего необходимо учесть условия его эксплуатации, т. е. климатические факторы, факторы пожаро- и взрывобезопасности. Необходимо учесть конструктивное исполнение двигателя по способу монтажа, исполнению конца вала.

### Выбор редуктора

Редуктор электромеханической системы кинематически связывает между собой электродвигатель, объект управления и датчики. Кинематические схемы редукторов и механических передач следящих систем очень разнообразны. Наиболее широко применяются редукторы с цилиндрическими зубчатыми колесами. Передаточные отношения редуктора определяются при выборе электродвигателя и датчиков, связанных с редуктором. Имеющие место кинематические погрешности, люфт и трение определяют свойства редуктора как элемента следящей системы. Наряду с цилиндрическими используют червячные, винтовые, реечные и цепные передачи. Динамические возможности следящей системы с червячным редуктором невысокие, что объясняется сравнительно большим люфтом червячной пары, однако, она обладает свойством самоторможения, что важно для вращательных координат с неуравновешенным статическим моментом. В последние годы получили развитие и применяются планетарные и волновые передачи, которые при больших передаточных отношениях компактнее цилиндрических и имеют высокий КПД, хорошую жесткость и безлюфтовость. Преимущество волновых редукторов в большом передаточном отношении в одной паре. Волновые редукторы находят широкое применение в робототехнике.

Когда в приводе значительную роль играют динамические нагрузки, имеется возможность оптимизации выбора передаточного числа редуктора. При увеличении передаточного числа уменьшается приведенный к валу электродвигателя момент инерции механизма и, следовательно, уменьшается время разгона ЭМС до номинальных оборотов. Однако при этом уменьшается номинальная скорость устано-



вившегося движения. При уменьшении значения передаточного числа редуктора растет установившееся значение частоты вращения, однако, время разгона и торможения увеличивается. В литературе [15] дается следующая зависимость для выбора оптимального  $i_{ред}$ , исходя из минимального времени выполнения перемещения по координате:

$$i_{ред} = \sqrt[3]{\frac{\Omega^2 \cdot J_{\Sigma}}{2 \cdot M_{\text{дв}} \cdot \eta_{ред}}}$$

или

$$i_{ред} = \frac{M_{\text{мех}}}{M_{\text{дв п}}} + \sqrt{\left(\frac{M_{\text{мех}}}{M_{\text{дв п}} \cdot \eta_{ред}}\right)^2 + \frac{J_{\text{мех}}}{1,1 \cdot J_{\text{дв}}}}$$

### Упрощенное построение скоростных диаграмм

При рассмотрении этого вопроса учитываем только механический переходный процесс. Для простоты анализа будем считать, что электродвигатель имеет постоянные во времени нагрузки: статическую  $M'_{ст} = const$  и динамическую  $M'_{дин} = J_{\Sigma} \varepsilon_{\text{дв}} = const$ , где  $\varepsilon_{\text{дв}} = d\Omega / dt$ . Эти условия, как правило, справедливы для промышленных роботов и станков с ЧПУ.

**Работа электродвигателя при ограничении ускорений.** У привода оптимального быстрого действия процесс отработки управляющего воздействия совершается в два этапа: на первом – разгон двигателя с ускорением  $\varepsilon_{\text{дв1}}$ , на втором – торможение двигателя с ускорением  $\varepsilon_{\text{дв2}}$ . Максимальное ускорение определяется выбором максимального вращающего момента двигателя при заданном статическом моменте нагрузки и моменте инерции системы. Естественно, что максимальное ускорение не должно превышать допустимое для механизма ускорение

$$\varepsilon_{\text{дв max}} < \varepsilon_{\text{мех доп}} i_{ред}$$

Уравнение движения ротора

$$M = M'_{ст} + J_{\Sigma} \varepsilon_{\text{дв}} \quad (13)$$

Обозначим  $k_m = M'_{ст} / M$ . Рекомендуется иметь  $k_m \cong 0,5$  с тем, чтобы процесс шел с достаточным ускорением. Получаем предельные ускорения:

- при разгоне

$$\varepsilon_{\text{дв1}} = M(1 - k_m) / J_{\Sigma} \quad (14)$$

- при торможении

$$\varepsilon_{\delta 2} = -M(1 + k_m) / J_{\Sigma} \quad (15)$$

Диаграмма процесса отработки заданного угла представлена на рис. 45.

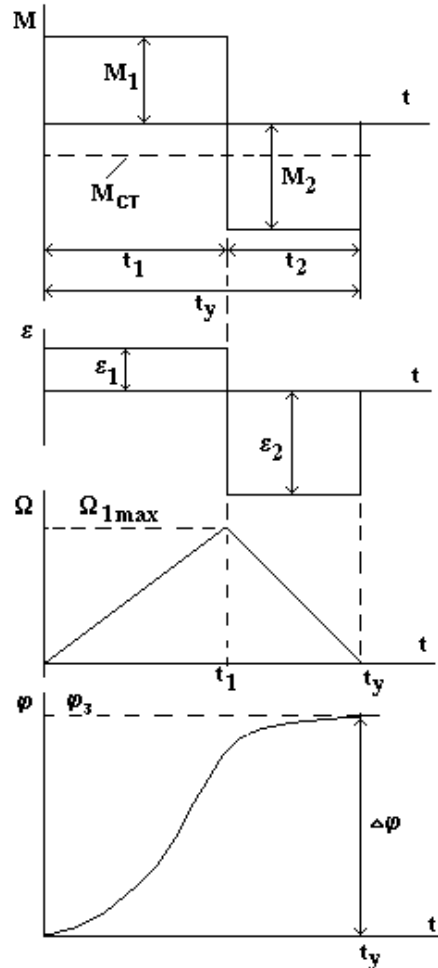


Рис. 45

За время разгона  $t_1$  частота вращения электродвигателя достигает значения  $\Omega_1 = \varepsilon_{\delta 1} t_1$ . Очевидно, что  $\Omega_1$  должна быть меньше максимально допустимой из условия  $\Omega_{max} \leq \Omega_{mex \ доп} \dot{i}_{ред}$ .

**Работа электродвигателя при ограничении ускорений и частоты вращения.** Особенностью этого режима работы является то, что часть периода управления  $t_{nc}$  двигатель работает с постоянной частотой вращения  $\Omega_{max} = \Omega_{mex \ доп} \dot{i}_{ред}$  (рис. 46).

При постоянной частоте вращения момент вращения двигателя равен моменту сопротивления механизма (нагрузки), а нарастание угла  $\varphi$  идет по линейному закону.

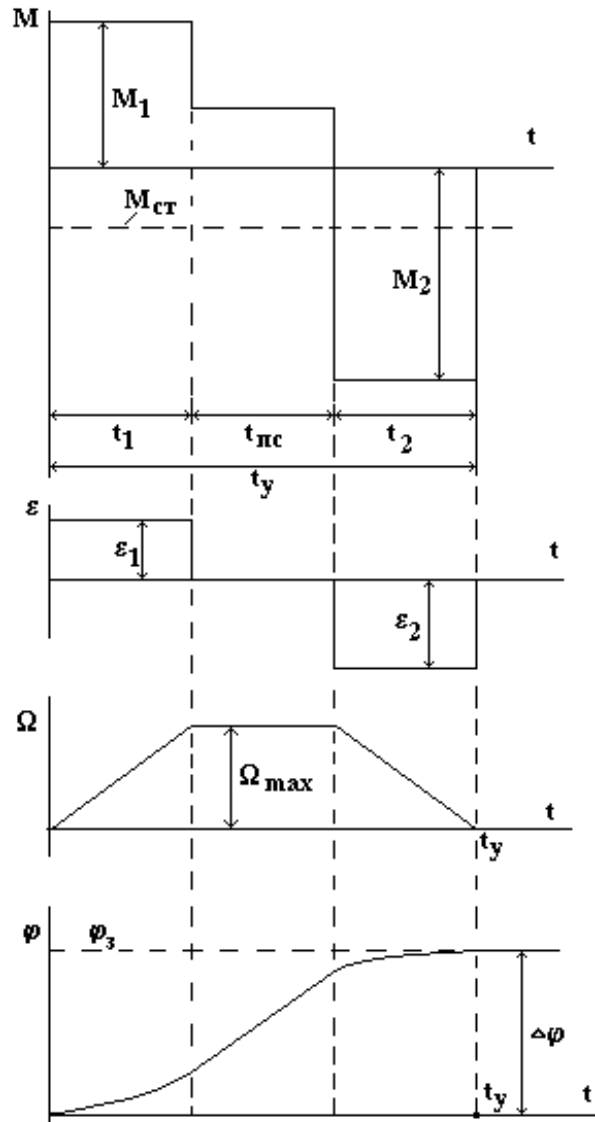


Рис. 46

### Тепловые режимы элементов энергетического канала

Температура нагрева элемента ЭМС зависит как от потерь энергии в элементе, так и от условий охлаждения. Процесс нагрева электродвигателя, преобразователя, трансформатора при неизменной нагрузке, а, следовательно, теплоте (потерях), выделяемой в единицу времени, описывается дифференциальным уравнением

$$A \tau dt + C d\tau = Q dt, \quad (16)$$

где  $A$  – теплопередача от элемента окружающей среде, калл/(°с, сек);  $C$  – теплоемкость массы элемента, калл/ °с;  $Q$  – тепловые потери в элементе, кал/ с;  $\tau$  – температура перегрева (разность температур элемента и окружающей среды), °с.

Таким образом, первое слагаемое (18) характеризует количество отдаваемого тепла, второе – поглощаемого тепла, правая часть уравнения – количество вырабатываемого тепла. Разделим все члены уравнения (18) на  $A dt$  и примем следующие обозначения:  $T_m = C/A$  – постоянная времени нагрева, сек;  $\tau_{уст} = Q/A$  – установившаяся разность температур элемента и среды. Тогда получаем

$$T_m d\tau/dt + \tau = \tau_{уст}. \quad (17)$$

Решение (19) дает изменение температуры двигателя во времени

$$\tau = \tau_{уст} (1 - \exp(-t / T_m)). \quad (18)$$

Кривые нагрева силового элемента электромеханической системы при различных  $Q$  представлены на рис. 47. Очевидно, что при  $Q < Q_{ном}$  элемент системы работает с недогрузкой, а при  $Q > Q_{ном}$  время работы элемента системы должно быть ограничено  $t_{доп}$ .

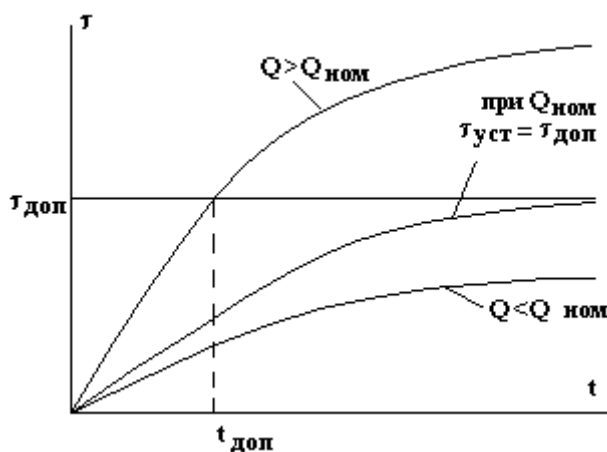


Рис. 47

При отключении силового элемента от сети  $Q = 0$ , идет охлаждение элемента. Дифференциальное уравнение процесса охлаждения имеет вид

$$A' \tau dt + Cd\tau = 0, \quad (19)$$

где  $A'$  – теплопередача неподвижного объекта. Соответственно  $T'_m = C/A'$  – постоянная времени охлаждения. В зависимости от системы охлаждения  $T'_m = (0,25-0,95) T_m$ .

Изменение температуры элемента при охлаждении описывается зависимостью

$$\tau = \tau_{max} \exp(-t / T'_m), \quad (20)$$

где  $\tau_{max}$  – достигнутое значение перегрева элемента при нагревании.

Если известна продолжительность работы двигателя при той или иной нагрузке и длительность пауз, то можно построить кривую изменения температуры элемента.

**Тепловые режимы электрического элемента системы.** Рассмотрим основные тепловые режимы трансформаторов, электрических двигателей, элементов преобразователей и других элементов силовых цепей. Различают следующие основные режимы: продолжительный, кратковременный и повторно-кратковременный. Тепловые режимы электродвигателей:

- *продолжительный (S1)* – за время работы температура электродвигателя достигает установившегося значения ( $t > 3 - 4T_m$ ) и далее не повышается;
- *кратковременный (S2)* – за время работы температура электродвигателя не достигает установившегося значения, а за время паузы снижается до температуры окружающей среды. Длительность включенного состояния  $t_{дон}$  определяют с помощью коэффициента термической нагрузки  $p_m$ , показывающего во сколько раз можно допустить превышение потерь при кратковременном режиме по отношению к номинальным

$$t_{дон} = T_m \ln(p_m / (p_m - 1)), \quad (21)$$

$$p_m = Q_{пер} / Q_{ном} = \tau_{уст пер} / \tau_{дон}, \quad (22)$$

где  $Q_{пер}$  – тепловые потери при перегрузке электродвигателя,  $\tau_{уст пер}$  – установившийся перепад температур при перегрузке электродвигателя,  $\tau_{дон}$  – допустимый перепад температур при длительном режиме работы.

Стандартные значения продолжительности рабочего периода при кратковременном режиме работы: 10, 30, 60, и 90 мин;

- *повторно-кратковременный режим (S3)* – за время включения  $t_{вкл}$  температура электродвигателя не достигает установившегося значения, а за время паузы  $t_n$  не успевает понизиться до температуры окружающей среды. Время цикла  $t_{ц} = t_{вкл} + t_n$ , а

$$ПВ = (t_{вкл} / t_{ц}) 100 \%. \quad (23)$$

Для промышленных электродвигателей указываются номинальные данные для четырех значений ПВ: 15, 25, 40 и 60 %. Продолжительность цикла принимается, если нет других указаний, равной 10 мин;

- *повторно-кратковременный режим с частыми пусками (S 4)*. Нормируются продолжительность включения, число пусков в час и отношение момента инерции механизма (нагрузки) к моменту инерции ротора электродвигателя. Превышение температуры не достигает установившегося значения.

**Проверка выбора электродвигателя по перегреву.** Основным требованием при выборе электродвигателя является соответствие его мощности условиям технологического процесса. Применение двигателя недостаточной мощности может привести к снижению производительности механизма, двигатель будет перегреваться, будет иметь место ускоренное старение изоляции и выход электродвигателя из строя. При завышенной мощности повышается стоимость электропривода, увеличиваются потери энергии за счет снижения КПД двигателя, а для асинхронных электродвигателей снижается также  $\cos \varphi$ .

Электрический двигатель не перегревается, если температурная кривая его нагрева лежит ниже  $\tau_{доп}$ . Вместо построения температурной кривой на практике используют более простые методы косвенной оценки теплового состояния электродвигателей: метод средних потерь или эквивалентного тока:

$$P_{cp} = \sqrt{\sum P_i^2 \frac{t_i}{t_u}}, \quad (24)$$

где  $P_i$  – мощность, развиваемая электродвигателем на  $t_i$ -м участке цикла его работы. Если  $P_{cp}$  не превышает номинальную мощность, то электродвигатель не перегревается и

$$I_{экр} = \sqrt{\sum I_i^2 \frac{t_i}{t_u}}, \quad (25)$$

где  $I_i$  – ток на  $t_i$ -м участке цикла работы электродвигателя. Если  $I_{экр}$  не превышает номинальный ток, то электродвигатель не перегревается.

### Выбор трансформатора

Трансформаторное оборудование выбирается в соответствии с параметрами преобразователя. Шкала номинальных выпрямленных токов  $I_{дн}$  и напряжений  $U_{дн}$  соответствует ГОСТ 29593–83. Важнейшим параметром силовых трансформаторов является номинальная мощность. Ряд номинальных мощностей трехфазных трансформаторов установлен ГОСТ 9680–77 и в пределах 100 кВА имеет вид: 0,01; 0,016; 0,025; 0,1; 0,16; 0,25; 1,0; 1,6; 2,5; 10; 16; 25; 100 кВА.

Наиболее широко распространены трехфазные трансформаторы с естественным воздушным охлаждением открытого исполнения типа ТСП для установки в силовых шкафах. Сухие трансформаторы типа ТСП выпускаются на мощности до 250 кВА. Трансформаторы с естественным воздушным охлаждением закрытого исполнения типа ТСЗП имеют те же параметры, что ТСП, но больший вес. Эти трансформаторы устанавли-

ваются в помещениях рядом со шкафами электропривода. Трансформаторы типа ТСЗП выпускаются на мощности 10...4000 кВА. Линейное напряжение сетевой обмотки трансформаторов мощностью до 250 кВА включительно равно 0,38 кВ, а у трансформаторов мощностью 400 кВА и выше линейное первичное напряжение равно 6 или 10 кВ.

Выбор мощности трансформатора определяется числом и мощностью электродвигателей, которые может обслуживать источник энергии, и типом системы управления. При позиционном управлении координаты (например, степени подвижности робота) управляются по очереди, следовательно, блок питания должен быть рассчитан на мощность наиболее мощного электродвигателя. При контурном управлении все степени подвижности работают одновременно, поэтому блок питания должен быть рассчитан на суммарную мощность приводов по всем координатам.

Тепловой расчет трансформатора проводится таким образом, чтобы допускались определенные периодические перегрузки, связанные с перегрузками электродвигателей. Расчетное значение вторичного фазного напряжения трансформатора должно учитывать падение напряжения на элементах преобразовательного блока (коэффициент  $k_r = 0,05 - 0,1$ ), учитывать возможное снижение напряжения сети ( $k_c = U_{c \min} / U_{cн}$ ), неполное открытие вентиля преобразователя ( $k_\alpha = 1/\cos\alpha_{\min}$ ). Принято при раздельном управлении брать  $\alpha_{\min} = 5^\circ$ , а при согласованном управлении  $\alpha_{\min} = 15^\circ$ .

Расчетная мощность трансформатора

$$S_{\text{тр расч}} = \frac{k_s \cdot k_j \cdot k_\alpha}{k_c} \left( 1 + \frac{k_r \cdot I_{a \max}}{I_{aн}} \right) \cdot U_{aн} \cdot I_{aн}, \quad (26)$$

где  $I_{a \max}$  – максимальное значение тока якоря, обеспечиваемое преобразователем при максимальной частоте вращения якоря,  $k_i$  – коэффициент, учитывающий отклонение тока от прямоугольной,  $k_i = 1,05 - 1,1$ ;  $k_s$  – коэффициент, учитывающий схему соединения вентиля. Для трехфазного однополупериодного выпрямления  $k_s = 1,48$ ; для шестифазного однополупериодного выпрямления  $k_s = 1,81$ ; для трехфазного двухполупериодного выпрямления  $k_s = 1,045$ .

Первичное напряжение указанных трансформаторов 380 В. Ряд рекомендуемых значений линейного напряжения вторичной обмотки имеет следующий вид: 65, 85, 95, 104, 133, 175, 208, 230, 260, 300, 335, 380, 416 В.

### Выбор элементов преобразователей

Выбор преобразователей основывается на технико-экономическом анализе различных вариантов с учетом обеспечения требуемых характеристик (максимальное значение тока, напряжение, диапазон их регули-

рования, быстродействие, возможность рекуперации энергии), а также массогабаритных и стоимостных показателей. Нагрузочная способность вентиля определяется максимально допустимой температурой полупроводниковой структуры, которая не должна быть превышена ни при каких режимах работы. Нагрев вентиля зависит от величины и формы тока и от условий охлаждения.

Полоса пропускания лучших образцов тиристорных преобразователей с двигателями постоянного тока составляет 40...45 Гц. Полоса пропускания транзисторных преобразователей составляет 100...200 Гц. Последнее обеспечивается применением транзисторов, работающих в режиме широтно-импульсного регулирования на высокой несущей частоте (1...3 кГц). Характерной особенностью транзисторных электроприводов является то, что кратность переходных токов ограничивается преобразователем, а не электродвигателем. При выборе преобразователей следует учитывать возможности улучшения их свойств за счет оптимизации схемотехнических построений.

Тепловой расчет элементов преобразователя должен учитывать возможные перегрузки электрических двигателей, определяемых типом нагрузки. Класс вентиля определяется обратным напряжением, которое определяется по формуле

$$U_{\max} = k_1 k_2 k_{\text{зн}} E_{d0}, \quad (27)$$

где  $k_1$  – коэффициент, определяемый видом защиты и ее параметрами (обычно принимают  $k_1 = 1,25$ );  $k_2$  – коэффициент перенапряжений, определяемый структурой преобразователя;  $k_{\text{зн}}$  – коэффициент запаса по напряжению, учитывающий возможные повышения напряжения сети и коммутационные перенапряжения ( $k_{\text{зн}} = 1,5-1,8$ );  $E_{d0}$  – максимальное значение выпрямленного напряжения на выходе преобразователя в режиме холостого хода.

Класс вентиля находится как отношение  $U_{\max} / 100$  с округлением до целого числа в большую сторону. Величина тока, на который должен быть рассчитан вентиль,

$$I_{\text{в}} = (I_{\text{ан}} + I_{\text{ур}}) / m_2,$$

где  $I_{\text{ур}}$  – среднее значение уравнительного тока.

### Выбор реакторов

В преобразователях постоянного тока применяют реакторы двух типов:

- сглаживающие реакторы, предназначенные для снижения пульсаций якорного тока;



- токоограничивающие реакторы, предназначенные для ограничения уравнительных токов при совместной работе катодной и анодной тиристорных групп. Уравнительные реакторы делают частично насыщающимися. При насыщении их индуктивность снижается до 30...50 % от ненасыщенного значения, что несколько снижает значение постоянной времени электромагнитных переходных процессов.

Выбор индуктивности сглаживающего реактора находится по формуле:

$$L_{c.p} = L_{\Sigma} - L_a - L_{mp} - L_{y.p}, \quad (28)$$

где  $L_{\Sigma}$  – суммарная индуктивность якорной цепи электродвигателя,  $L_a$  – индуктивность якорной обмотки,  $L_{mp}$  – индуктивность обмотки трансформатора  $L_{y.p}$  – индуктивность уравнительных реакторов, причем

$$L_{\Sigma} = e_n E_{d0} / i_e \omega_6 I_a, \quad (29)$$

где  $e_n$  – относительная величина первой гармонической пульсаций выпрямленного напряжения (зависит от схемы преобразователя и числа фаз, например, для трехфазной мостовой схемы  $e_n = 0,24$ , а для трехфазной нулевой схемы  $e_n = 0,52$ ),  $E_{d0}$  – максимальное значение выпрямленного напряжения при холостом ходе,  $\omega_6$  – угловая частота первой гармонической пульсаций выпрямленного напряжения,  $\omega_6 = 2\pi f_1 m_2$ ,  $f_1$  – частота напряжения сети переменного тока,  $m_2$  – число фаз выходной (вторичной) обмотки трансформатора,  $I_a$  – ток нагрузки,  $i_e$  – желаемая относительная величина эффективного значения первой гармонической пульсаций выпрямленного тока.

**Индуктивность уравнительного реактора.** Индуктивность уравнительного реактора находят по формуле

$$L_{yp} = U_{m.l} k_{\text{эф}} / \omega_l I_{yp} - 2 L_{mp}, \quad (30)$$

где  $U_{m.l}$  – амплитуда линейного напряжения вторичной обмотки трансформатора,  $k_{\text{эф}}$  – коэффициент, определяемый схемой преобразователя и углом управления  $\alpha$  (обычно принимают для трехфазных систем  $k_{\text{эф}} = 0,65$ , для шестифазных –  $0,18$ ),  $\omega_l$  – угловая частота напряжения сети,  $I_{yp}$  – величина уравнительного тока. Допустимая величина уравнительного тока определяется выбранным запасом по току тиристорам и трансформатора. Обычно принимают для электроприводов малой мощности  $I_{yp} = (0,2-0,3) I_{ан}$ , для средней и большой мощности  $I_{yp} = (0,05-0,1) I_{ан}$ .

### Выбор силовой коммутирующей аппаратуры

Силовая коммутирующая аппаратура включает автоматические выключатели, магнитные пускатели, контакторы. Достоинство автоматических выключателей в том, что они сочетают функции аппаратов

оперативных переключений с функциями защиты. Автоматические выключатели применяют для защиты тиристорных преобразователей и электродвигателя в аварийных режимах: при коротких замыканиях, перегрузках, недопустимых снижениях напряжения, для нечастых оперативных включений и отключений электрической цепи. Номинальное напряжение автомата должно быть не ниже напряжения сети, номинальный ток расцепителя автомата должен быть не меньше расчетного тока нагрузки. Автоматические выключатели могут устанавливаться как в цепях переменного тока, так и в цепях выпрямленного тока.

**Электромагнитные пускатели.** Электромагнитные пускатели предназначены для пуска, остановки, реверсирования трехфазных электродвигателей, а также для защиты от перегрузки недопустимой продолжительности, от токов, возникающих при обрыве одной из фаз.

**Контакты.** Контакты предназначены для включения и отключения силовых электрических цепей. В электроприводах контакты работают в продолжительном режиме. Катушки контактов запускаются постоянным током напряжением 24, 48, 110 или 220 В. Допустимая частота срабатывания контактов – до 1200 циклов в час при ПВ = 40 %.

#### **Выбор элементов защиты силовой части.**

Исходя из анализа возмущений, действующих на ЭМС извне, и возможных внутренних аварийных ситуаций применяют следующие защиты:

- защиту элементов силовой цепи от перегрузок по току, перенапряжений, а также от электрических и электромагнитных помех;
- защиту от механических и тепловых перегрузок, а также от последствий выхода из строя отдельных агрегатов;
- защиту обслуживающего персонала.

Задача устройств защиты от перенапряжений является уменьшение внутренних и внешних перенапряжений в такой степени, чтобы предотвратить появление опасных нагрузок на вентилях и обмотках.

Защита вентилях от внутренних перенапряжений в области малых и средних мощностей осуществляется шунтированием вентилях РС-звеньями. Для тиристоров с номинальным током до 100 А применяют шунтирование их варисторами.

Устройства максимальной токовой защиты должны защищать вентилях и обмотки от перегрузки по току путем размыкания цепи тока. Поэтому срабатывание максимальной токовой защиты связано с прерыванием технологического процесса. Выбор и согласование устройств максимальной токовой защиты производится так, чтобы они могли избирательно взаимодействовать друг с другом и с защищаемыми устрой-

ствами. Например, при наличии плавких предохранителей и выключателя с тепловым реле защита строится так, чтобы кривая перегрузочной способности вентиля шла выше характеристики срабатывания плавкого предохранителя, характеристика срабатывания выключателя ниже характеристики предохранителя.

Поскольку двигатели и трансформаторы могут выдерживать более высокие кратковременные перегрузки, чем вентильные схемы, устройства защиты преобразователей выполняют также функции защиты двигателей и трансформаторов. Рабочие перегрузки двигателей, процессы при их пуске, реверсе и торможении не должны вызывать срабатывания устройств защиты.

**Защита от перенапряжений.** Для защиты тиристоров от перенапряжений используют шунтирующие RC-цепочки, включаемые между катодом и анодом. Емкость конденсатора выбирается в пределах 0,25...2 МкФ, сопротивление резисторов лежит в пределах 5...40 Ом.

**Выбор предохранителей.** Предохранители приведенных серий предназначены для защиты сетей низкого напряжения от недопустимых длительных перегрузок и от коротких замыканий.

Номинальный ток плавкой вставки выбирается по формуле

$$I_{н\text{ плавк}} = k_n I_{н\text{ нагр}}, \quad (31)$$

где  $I_{н\text{ нагр}}$  – номинальный длительный ток нагрузки,  $k_n$  – коэффициент надежности.

При постоянной нагрузке  $k_n = 1,1 - 1,2$ . При переменной нагрузке, например, при пуске или реверсе электродвигателя, рекомендуют принимать  $k_n = 2 - 2,5$ .

**Типовые структуры перспективных систем управления приводами переменного тока.**

На рис. 48 показана структура привода переменного тока с векторным управлением. В качестве исполнительного двигателя может применяться либо синхронный двигатель с активным магнитоэлектрическим ротором, либо синхронный реактивный двигатель. Возможно использование этой структуры и для управления трехфазными вентильно-индукторными двигателями с разнополярным питанием, а также шаговыми двигателями в режиме бесколлекторных двигателей постоянного тока [16].

В качестве силового преобразователя используется инвертор на IGBT-ключаях или интеллектуальных силовых модулях. Драйверы ключей инвертора подключены непосредственно к выходам ШИМ-генератора микроконтроллера (А, А/, В, В/, С, С/), работающего в режиме широтно-импульсной модуляции базовых векторов (векторной

ШИМ-модуляции), что обеспечивает максимально высокую степень использования напряжения звена постоянного тока и минимизацию динамических потерь в инверторе (ниже об этом сказано более подробно).

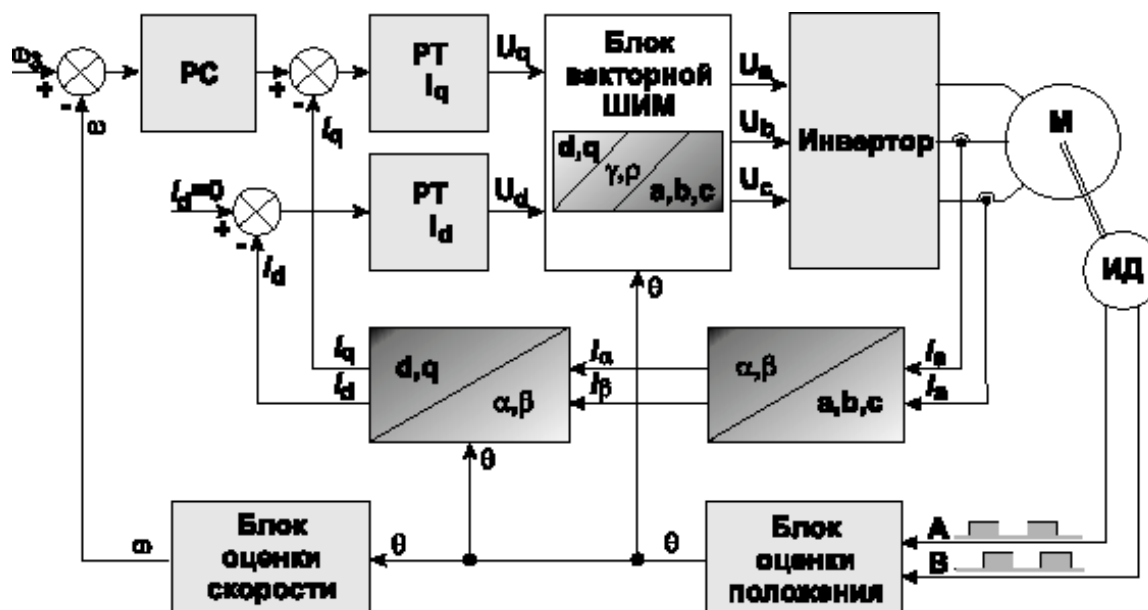


Рис. 48. Структурная схема привода переменного тока с векторным управлением

Структура на рис. 48 предполагает использование импульсного датчика положения ротора двигателя. Сигналы с датчика вводятся непосредственно в контроллер и обрабатываются в блоке оценки положения, который может быть реализован на основе специального периферийного устройства таймера с «квадратурным» режимом работы. Код механического положения ротора программно преобразуется в код электрического положения ротора внутри полюсного деления машины  $q$ . Для реализации блока оценки скорости могут применяться либо специальные периферийные устройства микроконтроллера, принцип действия которых основан на измерении временного интервала отработки двигателем заданного отрезка пути (эстиматоры скорости), либо периферийные устройства общего назначения, такие как процессоры событий или менеджеры событий. В последнем случае таймер, работающий в «квадратурном» режиме, является базовым для одного из каналов сравнения. Как только двигатель отработает заданный отрезок пути, возникнет прерывание по сравнению. В процедуре обслуживания этого прерывания центральный процессор определит временной интервал с момента предыдущего прерывания и выполнит расчет текущей скорости привода  $\omega$ .

Желательно, чтобы таймер, работающий в «квадратурном» режиме, допускал начальную инициализацию в соответствии с числом меток на

оборот импульсного датчика положения, а также имел режим автоматической коррекции своего состояния по реперному датчику. Эстиматор скорости должен работать с регулируемым разрешением как по числу импульсов на периоде измерения скорости (от 1 до 255), так и с регулируемым разрешением по времени (максимальное разрешение 50...100 нс при диапазоне регулирования разрешения 1:128). Если перечисленные выше требования к периферийным устройствам микроконтроллера будут выполнены, то окажется возможным измерение скорости в диапазоне, как минимум, 1:20000 с точностью, не хуже 0,1 %.

Для измерения электрических переменных микроконтроллер должен иметь встроенный АЦП с разрешением не ниже 10...12 двоичных разрядов и временем преобразования не хуже 5...10 мкс. Как правило, восьми каналов АЦП достаточно для приема не только сигналов обратных связей по токам фаз, но и сигналов обратных связей по напряжению и току в звене постоянного тока, а также внешних задающих сигналов. Дополнительные аналоговые сигналы используются для реализации защит инвертора и двигателя. Работа АЦП будет более производительной, если микроконтроллер допускает режим автоматического сканирования и запуска процесса преобразования. Обычно это делается либо с помощью отдельного периферийного устройства (процессора периферийных транзакций), либо с помощью режима автозапуска АЦП от процессора событий или генератора ШИМ-сигналов. Желательно, чтобы выборка как минимум двух аналоговых сигналов была одновременной.

Итак, на основе полученной информации о токах фаз  $i_a$  и  $i_b$  восстанавливается значение тока в фазе  $C$  ( $i_c$ ) и выполняется преобразование токов к неподвижной системе координат, связанной со статором ( $a, b, c$  @  $a, b$ ). Переход от неподвижной системы координат к подвижной, связанной с текущим положением ротора ( $a, b$  @  $d, q$ ), позволяет рассчитать компоненты результирующего вектора тока статора по осям  $d$  и  $q$ , соответственно.

Известно, что момент синхронного двигателя с возбуждением от постоянных магнитов прямо пропорционален составляющей вектора тока статора по поперечной оси  $q$ . При этом для минимизации общего потребляемого двигателем тока желательно поддерживать ток по продольной оси  $d$  равным нулю. Таким образом, выход регулятора скорости привода (РС) следует подключить на вход регулятора тока по поперечной оси (PT  $i_q$ ), а на вход регулятора тока по продольной оси (PT  $i_d$ ), подать нулевое задание (рис. 48). Обычно регуляторы скорости и токов являются пропорционально-интегральными.

Выходные сигналы регуляторов тока пропорциональны компонентам результирующего вектора напряжения статора по осям  $d$  и  $q$ , соответственно. В блоке векторной ШИМ-модуляции выполняется сначала

преобразование компонентов вектора напряжения к полярной системе координат  $(g,r)$ , связанной с продольной осью ротора, а затем, с учетом текущего положения ротора  $q$ , определяется рабочий сектор, внутрисекторный угол и рассчитываются компоненты базовых векторов в абсолютной системе координат, связанной со статором. Формируются напряжения, прикладываемые к обмоткам двигателя  $U_a, U_b, U_c$ .

Все перечисленные выше преобразования координат (прямые и обратные преобразования Парка и Кларка) должны выполняться в реальном времени. Желательно, чтобы используемый для реализации системы векторного управления микроконтроллер имел встроенную библиотеку функций, адаптированных для эффективного управления двигателями, в том числе функций преобразования координат. Время реализации каждой из этих функций не должно превышать нескольких микросекунд.

Отличительной особенностью системы векторного управления асинхронными двигателями является необходимость использования дополнительного вычислительного блока, в котором производится оценка текущего углового положения вектора потокосцепления ротора. Это делается на основе решения в реальном времени системы дифференциальных уравнений, составленных в соответствии с математической моделью двигателя. Естественно, что подобная операция требует дополнительных вычислительных ресурсов центрального процессора.

Рассмотренная выше структура системы управления обеспечивает автоматическое формирование в фазах двигателя синусоидальных токов и напряжений при работе исполнительного двигателя в режиме бесколлекторного двигателя постоянного тока с оптимальным углом коммутации и минимизацией пульсаций электромагнитного момента. В ряде применений, например, для приводов с вентильно-индукторными и бесколлекторными двигателями постоянного тока, вполне достаточно на интервале коммутации поддерживать в обмотке двигателя заданный фиксированный уровень тока.

Таким образом, полноценные системы векторного управления приводами переменного тока требуют для своей реализации высокопроизводительных микроконтроллеров с широким набором перечисленных выше встроенных периферийных устройств, допускающих совместную работу и требующих от центрального процессора минимальных ресурсов на свое обслуживание.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Соломенцев Ю.М (ред.) Технологические основы гибких производственных систем. – М.: Высшая школа, 2000. – 255 с.
2. Клюев А.С., Глазов Б.В., Дубровский А.Х., Клюев А.А.; Под ред. А.С. Клюева. Проектирование систем автоматизации технологических процессов: справочное пособие. 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 464 с.
3. Олссон Г., Пиани Д. Цифровые системы автоматизации и управления. – СПб.: Невский Диалект, 2001. – 557 с.
4. ГОСТ 34.602-89. Информационная технология. Комплекс стандартов на автоматизированные системы. Техническое задание на создание автоматизированной системы / Комплекс стандартов и руководящих документов на автоматизированные системы. Информационная технология. – М., 1991. – С. 3–15.
5. ГОСТ 21.404-85. Обозначения условные приборов и средств автоматизации.
6. ГОСТ 24.305-80. Требования к содержанию документов по информационному обеспечению.
7. P50.1.028-2001. Информационные технологии поддержки жизненного цикла изделия. Методология функционального моделирования.
8. ГОСТ ИСО 10303-1–99. Системы автоматизации производства и их интеграция. Представление данных об изделии и обмен этими данными. Часть 1. Общие представления и основополагающие принципы.
9. ГОСТ Р ИСО 10303-21–99. Системы автоматизации производства и их интеграция. Представление данных об изделии и обмен этими данными.
10. CALS (Поддержка жизненного цикла продукции): руководство по применению / Сост. А.Н. Давыдов, В.В. Баранов, Е.В. Судов, С.С. Шульга. – М.: Мин-во экономики РФ, НИЦ CALS-технологий «При-кладная логистика», ГУП «ВИМИ», 2000. – 44 с.
11. Уткин В.Б., Балдин К.В. Информационные системы и технологии в экономике: учебник для вузов. – М.: ЮНИТИ – ДАНА, 2003. – 335 с.
12. Ерков А., Хорощавцев А. Типы и применение регуляторов, Автоматизация и производство, № 3, 1996 Норенков И.П.
13. Кузьмик П.К. Информационная поддержка наукоемких изделий. CALS-технологии. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2002. – 320 с.
14. Федотов А.В., Автоматизация управления в производственных системах: учеб. пособие. – Омск: Изд-во ОмГТУ, 2001. – 368 с.
15. Хорьков К.А., Хорьков А.К. Электромеханические системы. Часть 1. – Томск: Изд-во ТПУ, 1999.
16. В. Козаченко. Основные тенденции развития встроенных систем управления двигателями. Chip news 2004.

Учебное издание

ГРОМАКОВ Евгений Иванович  
КАРАНКЕВИЧ Андрей Геннадьевич

## ПРОЕКТИРОВАНИЕ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ ДЛЯ ГИБКИХ АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ ПРОИЗВОДСТВ

Учебно-методическое пособие

**Издано в авторской редакции**

Научный редактор  
доктор технических наук, профессор *А.М. Малышенко*

Компьютерная верстка *К.С. Чечельницкая*  
Дизайн обложки *О.Ю. Аршинова*

Подписано к печати 28.09.2011. Формат 60x84/16. Бумага «Снегурочка».


Печать XEROX. Усл. печ. л. 8,84. Уч.-изд. л. 8,0.

Заказ \_\_\_-11. Тираж 35 экз.



Национальный исследовательский Томский политехнический университет  
Система менеджмента качества  
Издательства Томского политехнического университета сертифицирована  
NATIONAL QUALITY ASSURANCE по стандарту BS EN ISO 9001:2008



ИЗДАТЕЛЬСТВО  ТПУ. 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30  
Тел./факс: 8(3822)56-35-35, www.tpu.ru