

## **Создание управляющих алгоритмов сложных технологических процессов**

В.Е. Зюбин

*Рассмотрена методика, направленная на сокращение временных и финансовых затрат при создании управляющих алгоритмов сложных технологических процессов. Описана организация работ, основные этапы, структура производственных подразделений, их функции и информационное взаимодействие. Перечислены требования к программному обеспечению.*

**Введение.** Под сложными технологическими процессами понимаются многопараметрические и многокритериальные технологические процессы, характеризующиеся отсутствием масштабной инвариантности, т.е. технологические процессы, управление которыми осуществляется по нескольким параметрам. При этом конечный продукт должен удовлетворять нескольким критериям, а сам процесс характеризуется нестабильностью законов регулирования. Такие процессы широко известны в химической, металлургической и др. отраслях промышленности при получении сверхчистых, высокосоввершенных и редких материалов.

Нестабильность процесса и отсутствие его математического описания приводят к необходимости экспериментальных работ по выявлению взаимозависимости параметров и созданию управляющих алгоритмов. В условиях расширяющейся номенклатуры выпускаемой продукции, рыночной конъюнктуры, необходимости повысить экономические показатели производства расходы на экспериментальные работы становятся неотъемлемой частью затрат при эксплуатации. Это обстоятельство заставляет искать способы снижения ресурсоемкости эксперимента.

В статье излагается методика, позволяющая минимизировать временные и финансовые затраты при создании управляющих алгоритмов сложных технологических процессов. Описываются организация работ, основные этапы, структура производственных подразделений, их функции и информационное взаимодействие; перечисляются требования к программному обеспечению (ПО).

В качестве демонстрационного процесса взят процесс выращивания монокристаллов кремния методом Чохральского [1]. Терминология статьи приближена к используемой в стандартах «Единая система технологической документации» и «Единая система технологической подготовки производства» [2, 3].

**Специфика рассматриваемых задач.** Классический пример рассматриваемых объектов –

процесс выращивания монокристаллов кремния методом вытягивания из расплава (метод Чохральского [1]). Суть метода заключается в том, что поликристаллический кремний помещается в тигель, расплавляется, после чего в расплав опускается небольшой затравочный монокристалл. Затем затравочный монокристалл постепенно поднимается, и из расплавленного кремния на нем образуется слиток с монокристаллической структурой (рис. 1). Этот процесс имеет специфику, общую для рассматриваемых задач.

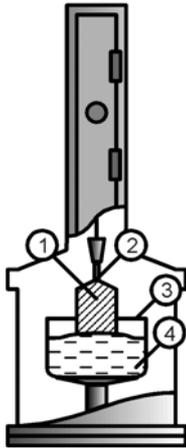


Рис.1. Метод Чохральского:

- 1 – выращиваемый кристалл,
- 2 – затравочный монокристалл,
- 3 – тигель, 4 – расплав.

*Многopараметричность.* Необходимость управления набором параметров (скоростью вытягивания, положением тигля относительно нагревателя, угловыми скоростями вращения, температурой среды, давлением и расходом

инертного газа), влияющих на рост кристалла.

*Многoкритериальность.* Качество конечного продукта характеризуется геометрической формой выращенного кристалла, совершенством кристаллической решетки, процентным содержанием и равномерностью распределения различных примесей, удельным сопротивлением и т.д. Геометрическую форму кристалла можно контролировать непосредственно в процессе выращивания. Исследование других характеристик предполагает распиливание кристалла на пластины, что невозможно делать в процессе выращивания.

*Отсутствие масштабной инвариантности.* Условия получения продукта существенно зависят от незначительных изменений в конструкции оборудования и (или) критериях качества. Например, требования к совершенству структуры кристалла определяют скорость вытягивания, а появление дополнительного элемента в тепловом узле может коренным образом изменить тепловую картину процесса. Это приводит к низкой эффективности аналитических методов моделирования процесса и, как следствие, к проведению серии крайне трудоемких работ по выявлению требуемых режимов выращивания и влияния параметров на конечный продукт. При этом возникают следующие проблемы:

*проблема вариативности продукции* – каждый новый тип изделия требует серии исследовательских работ. Невозможно создать единый неизменяемый управляющий алгоритм для всей номенклатуры изделий;

*проблема модифицируемости оборудования* – каждое изменение конструкции оборудования приводит к недостоверности всей накопленной численной информации о процессе, а поскольку теоретические прогнозы возможны лишь в качественной форме,

то и к необходимости накапливать численную информацию о процессе «с нуля». Погрешность изготовления оборудования приводит к тому, что невозможно создать единый неизменяемый управляющий алгоритм для группы оборудования;

*проблема нестабильности технологического процесса* – во время технологического процесса изменяется влияние параметров на его течение. Нестабильность касается как статических, так и динамических характеристик. Например, по мере роста кристалла кремния кардинально меняются тепловые поля внутри установки, конвекционные потоки внутри расплава и т.д. Существует целый ряд приемов, направленных на стабилизацию условий проведения технологического процесса (установка ускоряющих колец, гранулированная подпитка, «плавающие» тигли и т.д. [5, 6, 7]). Однако эти меры позволяют лишь уменьшить рассматриваемую нестабильность, поэтому управляющий алгоритм должен меняться во время технологического процесса.

Перечисленное выше означает, что необходимо провести большие объемы экспериментальных работ при получении управляющих алгоритмов (технологических программ выращивания), особенно при попытках получить продукцию в предельных условиях, при которых течение процесса является крайне капризным, нестационарным и связано с увеличением требований к комплексу технических средств по надежности и погрешностям регулирования.

Зарубежные производители, занимающиеся выращиванием монокристаллического кремния, как правило, имеют более чем пятидесятилетний опыт работы, собственный штат высококлассных специалистов. Новые технологические программы создаются преимущественно эволюционными методами. Технологии имеют характер «ноу-хау» и тщательно охраняются.

В этих условиях все попытки выйти на рынок «классическим» методом обречены на провал. Продукция с низкими потребительскими характеристиками, а это неизбежно на начальных этапах, не будет иметь спроса, и предприятие в течение длительного времени будет вынуждено работать вхолостую. В этих условиях насущно необходим поиск методики, позволяющей быстро ликвидировать технологическое отставание от ведущих фирм-производителей. Искомая методика подразумевает согласованную работу производственных и технологических подразделений и оперативную информационную связь между ними. Обеспечить такую связь можно только на основе цифровой техники.

Ниже вычленяются основные операции, выполняемые при серийном производстве и отработке управляющих алгоритмов, и предлагается производственно-технологическая структура, обеспечивающая исполнение этих функций. Далее рассматривается взаимодействие подразделений на различных этапах получения управляющих алгоритмов и обсуждаются требования к программному обеспечению работ.

**Основные производственно-технологические операции.** Получение технологических программ и серийное производство сопряжено с выполнением следующих основных функций.

*Анализ качества получаемой продукции* включает контроль течения технологического процесса и исследование уже готовой продукции на специализированном оборудовании. Однако полный анализ изделия по всем критериям требуется только на начальных этапах отработки технологических программ, когда стоит задача накопления экспериментальных данных. При выпуске изделий по отработанной технологии полный и дорогостоящий анализ уже не нужен. В этом случае достаточно знать, что во время технологического процесса отсутствовали нештатные ситуации, а готовое изделие удовлетворяет базовым критериям в контрольных точках.

*Обеспечение проведения технологического процесса* включает основные и вспомогательные режимы работы системы управления. При вспомогательных режимах проводятся тестирование и настройка системы. В состав основных режимов работы входят автоматический (отработка технологической программы без участия оператора), ручной (проведение технологического процесса оператором, действующим либо на основании личного опыта, либо на основании рекомендаций в виде технологических карт), супервизорный (режим, в котором автоматическая отработка технологических программ может незначительно корректироваться оператором).

*Информационное обеспечение* предполагает:

- архивирование параметров, происходящих событий и действий оператора во время технологического процесса;
- гибкое преобразование массива архивированных данных к специализированному виду, ориентированному на конкретного пользователя или выполнение конкретной функции [7];
- хранение технологической, конструкторской, программной и эксплуатационной документации;
- хранение данных по проведенным технологическим процессам для совершенствования технологии статистическими (data-mining) методами (например, на базе теории нечетких множеств, нейронных сетей и т.д. [8]).

*Функция моделирование и прогнозирование* включает:

- аналитическое, имитационное и статистическое моделирование объекта;
- выявление взаимозависимости параметров;
- определение оптимальных модификаций средств технологического оснащения, операций и режимов проведения технологического процесса.

*Формализация управляющих алгоритмов* – описание технологических программ в виде, допускающем их автоматическую отработку системой управления. Простая технологическая программа – это не предполагающее коррекцию описание режимов технологического процесса (изменения параметров). Однако для нестабильных технологических процессов простой технологической программы недостаточно. Поэтому вводится обратная связь по контролируемым параметрам. При обратной связи жестко заданные режимы оперативно

корректируются в зависимости от поведения контролируемых параметров. В общем случае технологическая программа содержит спецификацию:

- режимов технологического процесса в виде оптимальных управляющих воздействий (ОУВ);
- поведения контролируемых параметров для данного набора ОУВ;
- зависимости величины оперативной коррекции ОУВ от рассогласования между заданным и реальным поведением контролируемых параметров.

Для процесса выращивания кремния ОУВ задаются для температуры, положения тигля, скорости вытягивания, угловых скоростей вращения тигля и затравкодержателя, расхода газа и давления. Изменения этих параметров описываются в виде графиков зависимости от длины кристалла. Контролируемыми параметрами для выращивания кремния могут являться диаметр кристалла, масса кристалла или усредненная скорость вытягивания. Оперативная коррекция производится для ОУВ скорости вытягивания, температуры и угловой скорости вращения тигля. Например, величина коррекции ОУВ скорости вытягивания пропорциональна отклонению фактического диаметра кристалла от заданного: чем фактический диаметр меньше заданного, тем меньше скорость. В общем случае оперативные коррекции задаются в виде коэффициентов ПИД-регулятора.

*Коррекция средств технологического оснащения* подразделяется на этапы отработки технологического оборудования (базовых, стационарных компонентов) и технологической оснастки (демонтируемых частей), вспомогательных и расходных материалов.

Технологическое оборудование (каркас, фундамент, форма рабочей емкости и т.п.) отрабатывается один раз, затем стационарно устанавливается на производственном участке и в дальнейшем не изменяется. Технологическая оснастка, качество вспомогательных и расходных материалов определяют получение изделия с конкретными характеристиками и поэтому могут корректироваться в зависимости от типа выпускаемой продукции. Например, к кремнию для солнечных батарей предъявляются относительно невысокие требования по чистоте, что позволяет использовать более дешевый поликристаллический кремний и аргон (главные источники посторонних примесей).

**Структурные подразделения.** Выполнение вышеперечисленных функций обеспечивается следующими структурными подразделениями.

*Производственный участок* (рис. 2) оснащен специализированным цеховым оборудованием для выпуска продукции. Персонал – операторы, обслуживающие и управляющие оборудованием. На производственном участке выполняются функции «*Обеспечение проведения технологического процесса*», «*Информационное обеспечение*» и «*Анализ получаемой продукции*» (контроль параметров технологического процесса).

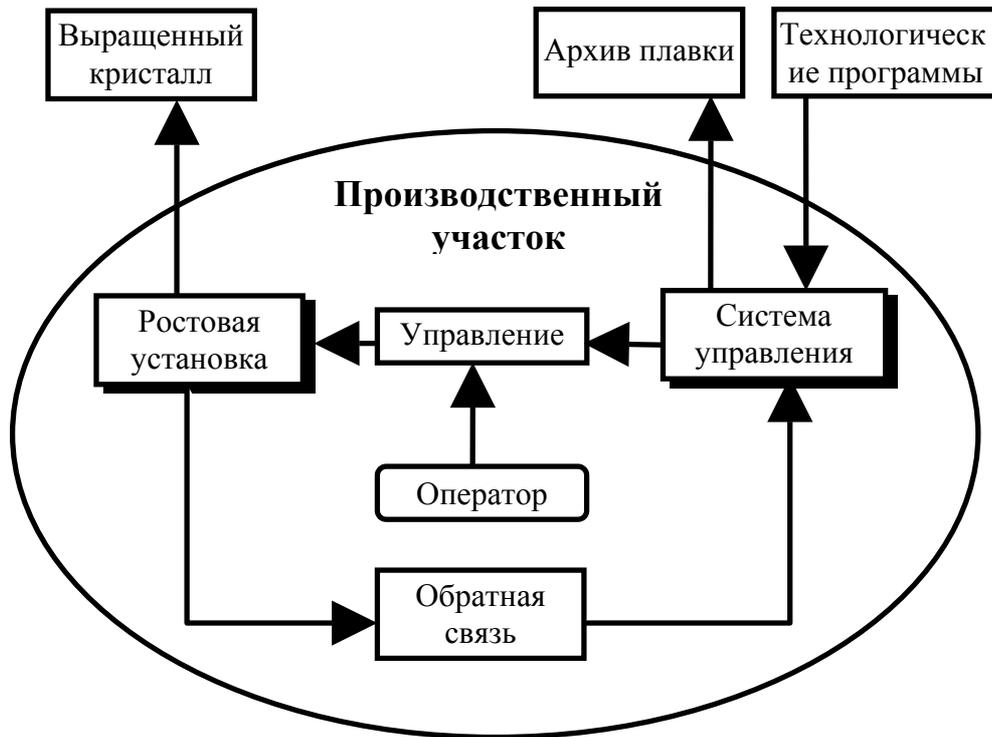


Рис. 2. Производственный участок.

Отдел технолога (рис. 3) оснащен набором специализированных программ для описания управляющих алгоритмов и обработки архивированных данных. Персонал – технологи. Отдел технолога выполняет функции «Формализация управляющих алгоритмов» и «Информационное обеспечение» (обработка архивированных данных для конкретных групп пользователей).

В Архивном отделе (см. рис. 3) находятся базы данных накопленной информации, конструкторской, технологической и программной документации. Архивный отдел выполняет часть функции «Информационное обеспечение» (хранение технологических программ и архивированных данных плавов). Важно отметить, что и программы, и архивированные данные плавов обязательно должны включать в себя всю информацию, необходимую для проведения технологического процесса. Например, в состав технологических программ помимо описания управляющего алгоритма обязательно входят указания о необходимой технологической оснастке, требования к расходным материалам, технологические и настроечные данные, характеристики получаемого изделия и т.д. Архив также малоценен без информации об исходной технологической программе и параметрах используемого оборудования.

Функции архивного отдела могут быть расширены функцией полномасштабного документооборота на предприятии.

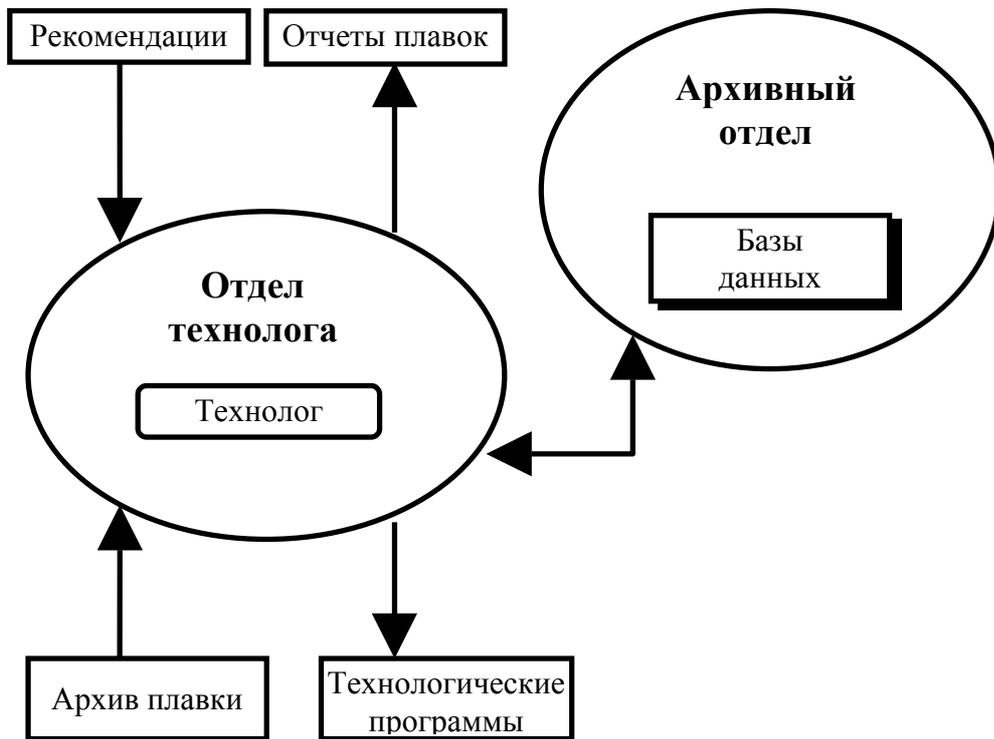


Рис. 3. Отдел технолога и архивный отдел.

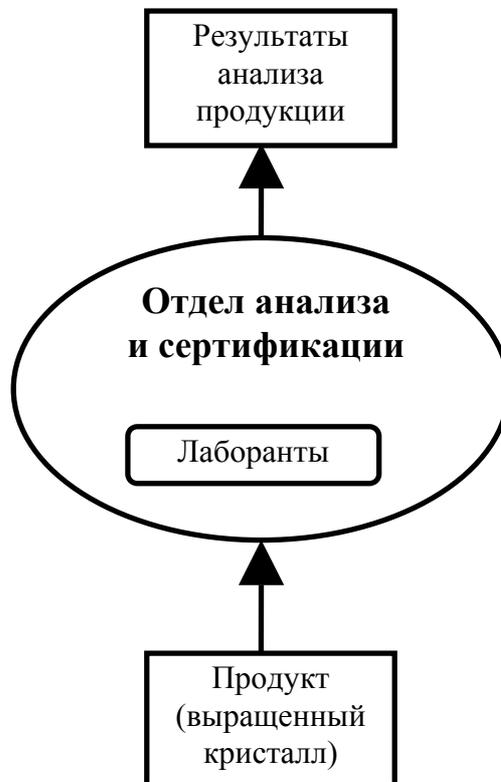


Рис. 4. Отдел анализа и сертификации.

*Отдел анализа и сертификации* (рис. 4) оснащен набором специализированного тестового оборудования и имеет соответствующее программное обеспечение. Персонал – научные

сотрудники. Отдел обеспечивает выполнение функции «Анализ и сертификация». На этапах разработки новых технологических программ отдел отвечает за детальный анализ продукции по полному списку критериев. На этапе серийного производства (упрощенный вид) – проводит сертификацию продукции.

*Отдел моделирования* (рис. 5) оснащен имитационным оборудованием и программами моделирования технологического процесса. Персонал – специалисты-теоретики, экспериментаторы. На этапах разработки и отработки технологии отдел занимается созданием модели объекта и прогнозированием, выдает рекомендации по изменению режимов проведения процесса. Специалисты принимают решения о «канонизации» управляющего алгоритма получения типового изделия. На этапах серийного производства деятельность отдела ограничивается анализом причин отклонений качества выпускаемой продукции от эталонной (при обнаружении брака и невозможности проведения анализа на уровне отдела технолога) и совершенствованием технологического процесса методами моделирования.

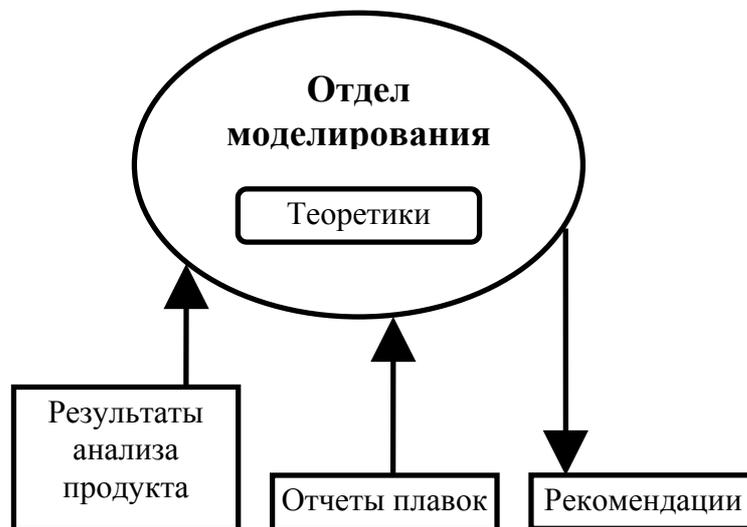


Рис. 5. Отдел моделирования.

*Конструкторский отдел* (рис. 6) является инженерно-техническим отделом. Персонал – инженеры-конструкторы, техники, наладчики контрольно-измерительной аппаратуры. На начальном этапе отдел разрабатывает технологическое оборудование. На этапе отработки новой технологии – разрабатывает и корректирует технологическую оснастку и расходные материалы. На этапе серийного производства отдел может быть представлен в виде подразделения, обеспечивающего техническое обслуживание оборудования (ремонт, профилактические работы, настройку и т.п.)

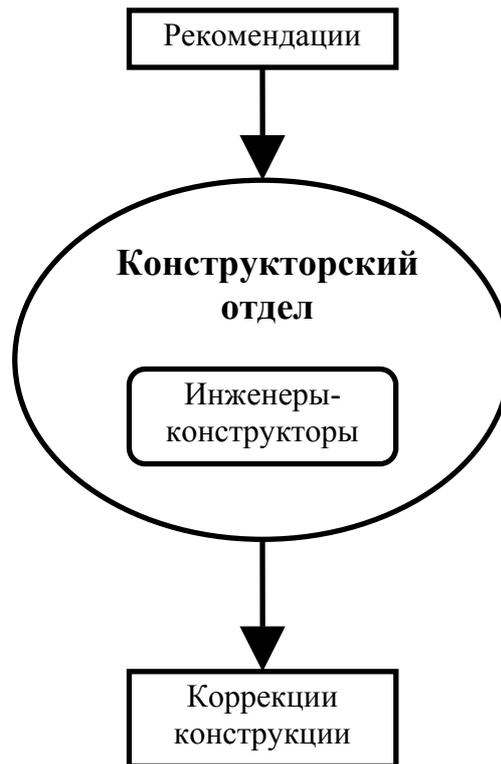


Рис. 6. Конструкторский отдел.

**Создание управляющего алгоритма** жестко привязано к этапам обработки средств технологического оснащения. На этапе обработки технологического оборудования (первый этап) определяется общий вид управляющего алгоритма: последовательность технологических операций, возможные варианты их проведения и черновой вариант технологической программы. На втором этапе (обработка технологической оснастки и материалов) проводится доводка черновой технологической программы под типовое изделие. После определения средств технологического оснащения и создания управляющего алгоритма следует серийный выпуск продукции.

*Обработка технологического оборудования. Тестовый технологический процесс.* Задачи этапа – отработать технологическое оборудование, показать на практике его пригодность, выявить черновой вариант режимов процесса. Сложность данного этапа заключается в том, что:

- технологическое оборудование является наиболее дорогой частью всего программно-аппаратного комплекса, и его коррекция крайне нежелательна;
- течение процесса определяется и технологическим оборудованием, и выбранными режимами. Поэтому в случае неудовлетворительного результата определить причину и направление дальнейших исследований (коррекция оборудования или режимов) затруднительно.

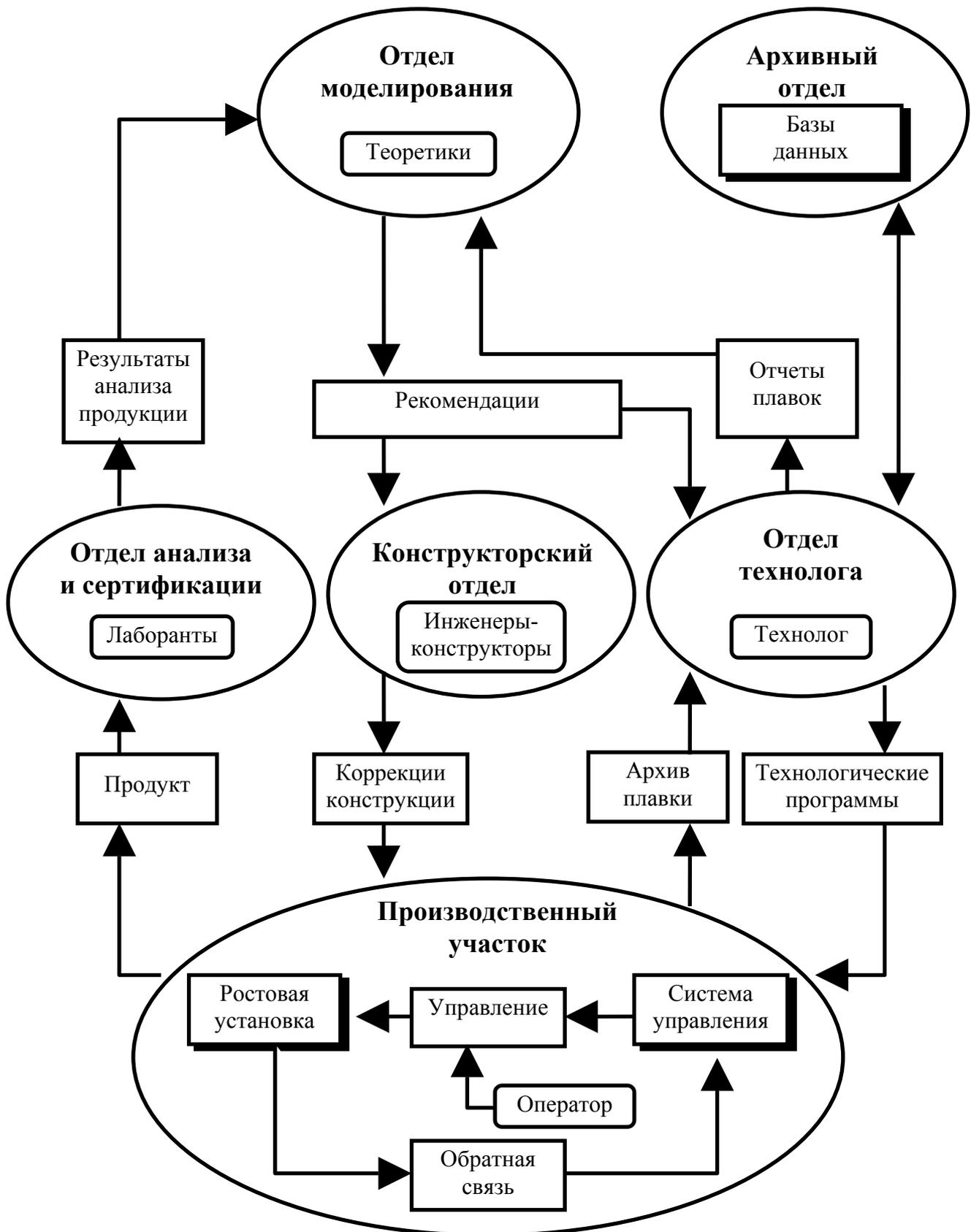


Рис. 7. Схема взаимодействия структурных подразделений.

Первоначальный базовый вариант технологического оборудования создается в соответствии с требованиями и рекомендациями отдела моделирования, полученными по результатам серии экспериментов на имитаторах. Технологическое оборудование (рис. 7) отрабатывается на типовом изделии, не имеющем (по возможности) специфических конструктивных признаков. Технологическая оснастка соответствует использованной при имитационном моделировании. Чтобы сократить время проведения работ и упростить выявление причин неудачных технологических процессов, качество основных и расходных материалов должно быть высоким. Управляющие воздействия из-за отсутствия достаточной информации о процессе формируются преимущественно в ручном режиме. Полученное изделие передается в отдел анализа и сертификации, где проводится исследование на соответствие предъявляемым критериям. Параллельно с этим отдел технолога формирует из архива отчет по режимам технологического процесса. На основании этих данных в отделе моделирования решается вопрос о возможности получения изделия с заданными характеристиками. При отрицательном заключении отдел моделирования выдает рекомендации по изменению конфигурации технологического оборудования, технологической оснастки или технологических операций. После коррекции проводится итерация. При положительном решении утверждается конфигурация технологического оборудования, фиксируется черновой вариант технологической оснастки, порядок и содержание технологических операций и режимов. Так называемый тестовый технологический процесс считается успешно проведенным.

*Отработка технологической оснастки, приспособлений, инструмента. Эталонный технологический процесс.* После отработки и утверждения конструкции технологического оборудования проводится детальная отработка оснастки, приспособлений и инструментов, технологических режимов и операций. Эти компоненты определяют конкретный набор характеристик изделия, что позволяет перейти к серийному выпуску типового изделия. В качестве отправной точки используются черновые варианты процесса, полученные на предыдущем этапе. Итерационный характер работ и схема взаимодействия подразделений сохраняются. Отличие от этапа отработки технологического оборудования заключается в том, что процесс ведется преимущественно в автоматическом режиме. Оператор задействован только в критических ситуациях. Результат процесса оформляется в виде отчетов по изделию (в отделе анализа и сертификации) и режимам его получения (в отделе технолога). Отдел моделирования дает заключение о получении изделия с заданными характеристиками и утверждает проведенный технологический процесс в качестве эталонного технологического процесса для типового изделия. При неудовлетворительных результатах отдел моделирования выдает рекомендации по изменению технологической оснастки, основных и вспомогательных материалов, операций и режимов процесса. При утверждении эталонного технологического процесса фиксируются: технологическая программа; данные, архивированные в течение эталонного технологического

процесса; порядок вспомогательных и основных операций; конфигурация технологической оснастки, приспособлений и инструментов; требования к характеристикам основных и вспомогательных материалов.

Данные оформляются в виде технологической документации и передаются для хранения в архивный отдел. При необходимости эта информация позволяет быстро перепрофилировать производство.

Вышеописанные работы проводятся каждый раз, когда необходимо выпускать новое типовое изделие.

*Серийный выпуск продукции.* При серийном выпуске продукции деятельность отделов упрощается. Отдел анализа и сертификации контролирует качество изделий по нескольким критическим точкам. Конструкторский отдел занимается техническим обслуживанием средств технологического оснащения. Отдел технолога обеспечивает соблюдение технологического регламента. Отдел моделирования на базе постоянно пополняемых данных уточняет модель объекта с целью совершенствования технологического процесса (повышение производительности, качества, внедрение материалосберегающих методов и т.п.).

**Требования к программному обеспечению (ПО).** Рассмотренные функциональные, организационные и информационные ракурсы получения управляющих алгоритмов позволяют сформулировать требования к ПО производственных подразделений. Общими требованиями к используемому ПО являются бесшовное взаимодействие при обмене данными и возможность интеграции в АСУП [9].

*ПО оператора (производственный участок).* ПО оператора должно обеспечивать управление оборудованием, регулирование параметров, отработку технологических программ, тестирование и диагностику (системы управления и измерительных подсистем, исправности и соответствия допускам комплекса технических средств), выполнение вспомогательных режимов (паспортизации, настройки и т.п.); коммуникацию и дружественный интерфейс, архивирование параметров и событий. ПО оператора должно гибко настраиваться на типовой технологический процесс. Для этого ПО целесообразно проектировать в виде двух взаимодействующих частей. Первая часть специфицирует групповой технологический процесс и не модифицируется в процессе эксплуатации. Вторая часть должна предусматривать оперативную настройку алгоритма на типовой процесс (необходимо для быстрого перепрофилирования производства) и технологическое оснащение, что позволяет использовать единую технологическую программу для группы оборудования. Кроме этого следует в особом порядке отметить повышенные требования к надежности ПО этого уровня [10, 11]. Связь с отделом технолога должна обеспечивать загрузку конфигурации, технологических программ, передачу архивов плавок и оперативный доступ к текущей информации технологического процесса. Интерфейс оператора должен предусматривать визуализацию текущего состояния объекта, средства ввода команд и

заданий, получение справочной информации по технологическому процессу и системе управления. В особо ответственных случаях для организации интерфейса оператора следует использовать сенсорные экраны, а возникновение важных событий сопровождать голосовыми сообщениями.

*ПО технолога* должно обеспечивать создание технологических программ и технологических карт, настройку модифицируемой части ПО оператора, удаленный мониторинг рабочего места оператора, создание отчетов технологического процесса, анализ архивированных параметров и событий, автоматизированное преобразование архивов в технологические программы и печать документов. ПО технолога не предполагает жестких требований по надежности, что позволяет использовать операционные системы общего назначения. Связь с ПО производственного участка должна допускать взаимодействие с несколькими рабочими местами оператора. Связь с базами данных обеспечивает интеграцию отдела технолога в производственную систему.

*ПО баз данных* должно предусматривать хранение технологических программ и карт, архивов технологических процессов, конструкторской и программной документации, наборов конфигурационных параметров и справочной информации по системе управления и технологическому процессу. Архив технологических процессов должен допускать восстановление полной информации о процессе: кроме сохраненных событий и параметров архив должен содержать данные об используемых средствах технологического оснащения, конфигурационных параметрах, технологической программе и характеристиках изделия, полученного в результате процесса.

*ПО отдела конструктора* должно обеспечивать автоматизированное создание конструкторской документации на средства технологического оснащения и дальнейшее использование этой документации при моделировании. Допустимо использовать ПО черчения типа AutoCAD [12]. Интеграция отдела в систему осуществляется через базы данных.

*ПО отдела анализа и сертификации* должно обеспечивать автоматизированное измерение характеристик полученного изделия и оформление полученных данных в виде документа. В зависимости от стадии создания управляющего алгоритма глубина измерений варьируется от детального исследования (при отработке средств технологического оснащения) до сокращенного варианта (при серийном производстве). Связь с базами данных интегрирует отдел анализа и сертификации в систему (хранение характеристик полученного изделия, автоматическая паспортизация изделий).

*ПО отдела Моделирования* должно обеспечивать построение моделей процесса аналитическими и статистическими методами и моделирование технологического процесса. Необходимая для функционирования отдела информация (паспорта кристаллов, архивы

процессов, технологические программы, конструкторская документация) поставляется через базы данных.

**Заключение.** На примере процесса выращивания монокристаллического кремния методом Чохральского рассмотрена проблема получения управляющих алгоритмов для многопараметрических и многокритериальных технологических процессов, характеризующихся отсутствием масштабной инвариантности. Показано, что постоянный рост требований к качеству продукции приводит к необходимости разрабатывать комплексные решения, в которых эксперимент и совершенствование методик получения конечного продукта совмещены со штатной работой предприятия. При этом задача организации оперативной связи между контролем качества продукции, исследовательским отделом, отделом технолога и производственным участком может быть решена только на основе цифровых технологий, обеспечивающих высокую степень повторяемости ведения плавки, автоматическое документирование параметров и формализацию процедур анализа и обработки больших объемов данных. Выявлены основные операции, необходимые для получения технологических программ, предложена производственная структура и информационно-функциональная модель организации работ. Модель предусматривает «безударный» переход от отработки средств технологического оснащения и создания управляющих алгоритмов к серийному производству с возможностью расширения номенклатуры производимой продукции. Получение управляющих алгоритмов организовано как сходящийся итерационный процесс. Накопление экспериментальной информации в базах данных облегчает совершенствование технологического процесса. Предусмотрено оперативное перепрофилирование производства по номенклатуре изделий. Сформулированы базовые требования к программному обеспечению структурных единиц с учетом специфики рассматриваемого класса задач. Результаты исследования могут быть использованы для повышения эффективности уже функционирующих производств и при разработке АСУ на вновь создаваемых предприятиях.

### **Список литературы**

1. Лодиз Р., Паркер Р. Рост монокристаллов. М.: Мир, 1974.
2. ГОСТ 3.1109–82 Единая система технологической документации. Термины и определения основных понятий.
3. ГОСТ 3.1102–81 Единая система технологической документации. Стадии разработки и виды документов.
4. Echizenya Kazuhiko. Double crucible for continuously pulling up single crystal. Patent Number: JP2180787. Publication date: 1990-07-13.

5. Hamada Ken, Tanabe Hiroyuki. Process for growing a silicon single crystal. Patent Number: US6284041. Publication date: 2001-09-04.
6. Kawahigashi Fumio, Asano Hiroshi, Kubo Takayuki, Takaoka Naohiro. Crystal growth apparatus. Patent Number: WO0231234. Publication date: 2002-04-18.
7. Зюбин В.Е., Кузнецов С.А. Проблемы классификаций в машиностроении. Автоматизация и современные технологии. 1999. №2.
8. Буров Константин. Обнаружение знаний в хранилищах данных. Открытые системы. 1999. №5-6.
9. Мурин Дмитрий. Полная автоматизация кремниевого производства. Открытые системы. 2002. №12.
10. Зюбин В.Е. Исследование условий применимости языка параллельного программирования СПАРМ для задач построения надежных управляющих программ. Распределенная обработка информации: Тр./Шестой международный семинар. Новосибирск, 1998.
11. Булавский Д.В., Зюбин В.Е., Карлсон Н.Н., Криворучко В.О., Миронов В.В. Автоматизированная система управления установкой для выращивания монокристаллов кремния. Автометрия. 1996. №2.
12. Кузнецов С.А. AutoCAD: мифы и реальность. Приборы и системы. 2000. №12.

*Статья опубликована в журнале «Автоматизация и современные технологии». 2004. №8. С.23-31.*