ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ПО ОБРАЗОВАНИЮ
МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ИНДУСТРИАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

В.П. Новиков

АВТОМАТИЗАЦИЯ ЛИТЕЙНОГО ПРОИЗВОДСТВА

Часть 1

УПРАВЛЕНИЕ ЛИТЕЙНЫМИ ПРОЦЕССАМИ

Учебное пособие

Издание 3-е, стереотипное

Допущено Учебно-методическим объединением вузов по университетскому политехническому образованию в качестве учебного пособия для студентов высших учебных заведений, обучающихся по направлению подготовки дипломированных специалистов 651400 «Машиностроительные технологии и оборудование», специальности 120300 «Машины и технология литейного производства»

Москва 2008

УДК 621.74
ББК 34.3
Н73

Рецензент
Л.Ю. Коротченко, ученый секретарь УМК
по специальности 120300, к.т.н., доцент

Новиков В.П.
Н73 Автоматизация литейного производства. Часть 1. Управление литейными процессами: Учебное пособие. – М.: МГИУ, 2008. – 292 с.

ISBN 978-5-2760-1524-8 (Ч.1)
978-5-2760-1523-1

В учебном пособии рассматриваются вопросы управления литейными процессами. Освещаются вопросы подготовки технологического процесса к автоматизации, использование технологических, конструкторских и организационных средств для эффективного решения задач управления. Анализируются динамические и статистические характеристики литейных процессов. Описываются информационные средства, средства управления процессами и вычислительная техника систем управления. Излагаются методики анализа технологического процесса и синтеза системы управления в объёме, необходимом для разработчика литейных технологий. Приводится широкий спектр методов и алгоритмов управления и использования вычислительных средств для решения задач управления. Показана связь систем управления процессами с системой менеджмента качества по стандартам ISO 9000.

Предназначено студентам специальности «Машины и технология литейного производства».

УДК 621.74
ББК 34.3

ISBN 978-5-2760-1524-8 (Ч.1)
978-5-2760-1523-1

© В.П. Новиков, 2005
© МГИУ, 2005

ВВЕДЕНИЕ

Автоматизация - применение автоматических технических средств и систем управления, освобождающих человека частично или полностью от непосредственного участия в процессах получения, преобразования, передачи и использования энергии, материалов или информации.

Цель автоматизации - повышение производительности и эффективности труда, улучшение качества продукции, оптимизация планирования и управления, устранение человека от работы в условиях, опасных для здоровья.

Совершенствование технологического процесса литья, повышение уровня его автоматизации в настоящее время идёт по пути разработки оптимальных схем процессов, обеспечивающих сокращение количества операций, возможность автоматического контроля и управления параметрами процессов, создания соответствующего оборудования и разработки новых технических средств для контроля и управления, разработки методов управления с использованием современных возможностей вычислительной техники.

Все эти вопросы находят отражение в учебной дисциплине «Автоматизация литейных процессов».

Этот курс посвящён новейшим достижениям в области производства отливок и поэтому его фактическое, предметное содержание быстро меняется. Ещё сравнительно недавно к его сфере относили вопросы автоматизации заливки, пневмотранспорта материалов, некоторое оборудование автоматических линий формовки. Сейчас это оборудование всё чаще перемещается из работ (статей, книг) по автоматизации в учебники по литейному оборудованию.

С другой стороны, весьма расширилась тематика, посвящённая специфическим методам решения задач управления литейным технологическим процессом. Это произошло благодаря тем очень широким возможностям, которые предоставляет современная вычислительная техника для решения сложных задач литейного производства (в том числе глубокая статистическая обработка различной информации, увязка процессов, далеко удалённых друг от друга во времени и пространстве, решение сложных динамических и тепловых задач).

Тема пособия - нижний уровень АСУ ТП литейного производства, так называемый уровень контроллеров.

По вопросам же создания технических средств для выполнения задач автоматизации автор рекомендует читателям обратиться к учебникам и монографиям по автоматическому литейному оборудованию.

В настоящее время для описания структуры и функционирования автоматических систем используется много различных методов. Многие из них требуют глубоких знаний в области теории автоматического управления, электроники, вычислительной техники и доступны только для специалистов, работающих в этих областях техники.

Одной из важных методических задач, решаемых в этом пособии, является выбор методов, достаточно адекватно описывающих устройство и работу автоматических систем управления и в то же время не содержащих описаний подробностей их устройства и процессов, протекающих в них. Последнее необходимо для специалистов, разрабатывающих подобные устройства и обеспечивающих их исправное функционирование.

Для специалиста в области технологии, использующего некоторое техническое устройство для целей управления технологическим процессом, важно знать входную информацию, которую необходимо сообщить этому устройству, и те управляющие сигналы, которое оно производит.

Поэтому следовало выбрать такие способы описания, которые были бы доступны и понятны как для специалистов в области литейного производства, так и для специалистов в области автоматического управления, служили бы «языком общения» между ними.

Для описания методов и систем управления в этом пособии выбраны:

- Описание функциональных схем систем автоматизации технологических процессов на основе ГОСТа 21.404–85 «Приборы и средства автоматизации. Обозначения условные в схемах автоматизации технологических процессов».
- Метод описания алгоритмов управления и условий для дискретных автоматов в виде логической схемы алгоритма, и особенно в виде граф – схемы алгоритма. Последняя соответствует языку релейных диаграмм, входящему в международный стандарт IEC 61131–3 «Программируемые контроллеры. Языки программирования».
- Схемы алгоритмов и программ для вычислительной техники по ГОСТ 19.002–80 и ГОСТ 19.003–80 «Единая система программной документации. Схемы алгоритмов и программ».

Функциональные схемы систем автоматизации хорошо описывают структуру систем автоматического контроля, управления и регулирования технологического процесса и оснащение объекта управления приборами и средствами автоматизации.

Граф-схемы алгоритмов устройств дискретной автоматики наглядно представляют функционирование этих устройств. Они удобны

для описания дискретных систем управления различными установками и устройствами.

Схемы алгоритмов и программ для вычислительной техники позволяют гибко, с требуемой глубиной детализации описать их работу.

В настоящее время происходит «смена» основ управления. В промышленности сложилась такая ситуация, что в производстве используется оборудование и приборы, разработанные и созданные как до периода интенсивного использования вычислительной техники, использующее для решения задач управления «жёсткие» электрические (контактные и бесконтактные), пневматические и гидравлические схемы, и регуляторы, скомпонованные из таких схем и механических узлов, так и использующие современные программные средства управления, например программируемые контроллеры. И на производстве, и в литературе есть примеры использования того и другого. Техническая и учебная литература, выпущенная несколько лет назад, не отражает значительных изменений, происшедших в последнее время в связи с применением вычислительной техники в промышленности. Сегодня студенты должны знать и старую, и новую технику.

В связи с этим в пособии на некоторых примерах показано, как решались задачи управления литейными процессами на устаревшей, но ещё используемой, аналоговой или релейной технике, как они могут решаться в настоящее время, какие преимущества появляются при использовании вычислительной техники.

Современное производство всё шире переходит от контроля качества продукции к контролю процессов получения продукции. В основе такого перехода лежит система стандартов менеджмента качества серии ISO 9000. В России действует отечественная аутентичная версия этих стандартов – ГОСТ Р ИСО серии 9000. Одним из компонентов новой системы является организация сбора информации о процессах и своевременное использование этой информации в целях совершенствования производства.

В силу ряда особенностей литейного производства оно всегда основывалось на обеспечении стабильности материалов и процессов. Новая система даёт новый импульс работам по совершенствованию литейных процессов в этом направлении. Поэтому в пособии уделено особое внимание выработке информации для системы менеджмента качества предприятия.

Разработка и эксплуатация технологических процессов и оборудования в области литейного производства представляется следующей схемой.

Специалист по литейному производству разрабатывает новый технологический процесс (и соответственно оборудование, на котором этот процесс будет выполняться). Автоматическое управление этим процессом (и оборудованием) выполняет специалист по автоматическому управлению на основе технического задания, выданного ему разработчиком процесса.

После изготовления оборудования процесс начинает функционировать. При этом техническое обслуживание и наладку средств автоматики выполняет служба КИПиА (контрольно-измерительных приборов и автоматики) предприятия, а специалист по технологии использует средства автоматики для управления процессом. Из описанной схемы взаимодействия специалистов по технологии и по автоматическим средствам управления и вытекают задачи этого курса:

- обеспечить взаимодействие этих специалистов, дать специалисту по технологии язык общения со специалистом по управлению, научить его грамотно ставить и описывать задачи управления;
- дать информацию о возможностях автоматического управления;
- показать влияние свойств объекта автоматизации на возможности и сложность выполнения задач автоматического управления, с тем чтобы создавать объекты, обеспечивающие наиболее эффективное достижение задач управления;
- эффективно использовать возможности автоматических средств управления.

ГЛАВА 1

ОСНОВЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ

§ 1. Технологические, конструкторские и организационные методы решения задач управления

Стабильность – основа качества. Историческая справка

Одна и та же техническая задача может быть решена разными средствами. В ходе развития литейной технологии накопилось множество методов, приёмов и средств организационного, конструктивного и технологического характера, решающих задачи управления технологическим процессом. Напомним, что главной задачей управления процессом получения отливки является получение качественной продукции. Обычно получение этой продукции должно быть экономически целесообразно (то есть выгодно). В ряде случаев помимо или вместо требования экономической целесообразности имеются требования социального или другого характера, лежащие вне круга технических проблем и производства в целом.

На ранней стадии развития техники основным методом решения задач управления было получение качества за счёт обеспечения стабильных, постоянных, неизменных условий производства. Особенно это требование было характерно для производства отливок в связи с тем, что качество отливок можно было оценить только уже после их изготовления или даже после их механической обработки (процесс изготовления отливки характеризуется большими временными запаздываниями). В связи с этим для литейщиков очень полезен такой исторический пример. В начале XIX в. происходил бурный рост машиностроения. Он начался со строительства крупных морских судов. Для них надо было научиться изготавливать крупные, весом в несколько тонн, стальные отливки. Методов получения больших количеств жидкой стали (мартеновского, конверторного) в то время ещё не существовало. Жидкую сталь выплавляли в горнах (ёмкостью в несколько десятков килограмм), горение кокса в горнах обеспечивали ручными мехами (механические воздуходувки тогда почти не применялись) и носили жидкий металл к литейной форме в ручных ковшах, которые переносились четырьмя рабочими.

В это время, когда ещё не умели измерять температуру жидкой стали, а содержание в ней углерода определялось по виду искр, вылетающих из металла (вероятнее всего, ещё и не предполагали, что это

надо знать), потребовалось получить стальную отливку весом в пять тонн для ахтерштевня (рамы руля) корабля.

За решение этой задачи взялась одна маленькая фирма, носившая имя Круппа. Она возникла в конце XVIII в. в одной немецкой деревушке как шорная мастерская (делала упряжь для лошадей), а в начале XIX в. «переквалифицировалась» на производство металлических изделий.

Техническая задача была решена следующим образом. Было построено 100 горнов и 100 одинаковых мехов для них. Была подобрана однородная металлическая шихта (куски железа одинакового размера), а кокс просеян через сито. Куски кокса также имели примерно одинаковый размер, а коксовая мелочь была удалена. Рабочие, раздувавшие меха, при плавке металла для этой отливки делали строго заданное одинаковое число взмахов мехов в минуту. Горны разжигали строго по секундомеру, с заранее рассчитанным смещением по времени последовательно для всех горнов. Эти меры обеспечили готовность металла в разных горнах последовательно один за другим. При этом металл в горнах не передерживался (что грозит выгоранием углерода, особенно в таких маленьких ёмкостях). Пока заливали в форму металл из одного горна, подходил металл в очередном горне, и струя металла, поступающего в форму, не прерывалась при заливке всей отливки. Позже эта отливка демонстрировалась на Всемирной выставке в Лондоне в 30-х годах XIX в. и была награждена золотой медалью.

К сожалению, эта фирма позже «прославилась» изготовлением оружия для немецкой армии и была ликвидирована после Второй мировой войны (материал взят из книги «Оружие Круппа», Политиздат, 1989 г.).

Этот пример показывает, насколько важна для получения качественных отливок стабильность технологических параметров и всего технологического процесса, чёткая организация процесса.

Ещё в начале XX в. будущий «дедушка русских литейщиков», а тогда молодой инженер П.Н. Рубцов, принимая крупные отливки для русских заводов от немецких фирм, на предъявляемые им рекламации по поводу наличия в отливках крупных раковин получал пояснения, что существует «литейный чёрт», и раковины – его проделки. Это было время, когда в литейном процессе иногда возникал брак, который невозможно было объяснить и предвидеть из-за недостатка знаний о процессе и отсутствия средств его контроля. Тогда в распоряжении литейщиков были только лабораторные приборы для контроля проч-

ности, газопроницаемости и влажности формовочной смеси и ручные твёрдомеры для контроля плотности формы.

Поэтому на протяжении двух последних веков (когда инженеры уже осознавали необходимость и содержание задач управления процессами) качество литья обеспечивалось максимальной стабилизацией входных воздействий (например, использованием одних и тех же карьеров для формовочных материалов, одних и тех же поставщиков чушкового чугуна или алюминия).

В настоящее время, при несравненно больших возможностях решения задач управления в связи с применением вычислительных машин, появились примеры эффективного решения задач управления по стабилизации входных возмущений и управлению с учётом наличия таких возмущений. Тем не менее, вне области таких решений стабилизация входных воздействий различными техническими и организационными средствами является одним из необходимых и важнейших условий получения качественной продукции.

Подготовка технологического процесса к автоматизации

Технологические процессы литейного производства обычно достаточно сложны, они состоят из большого количества разных операций (операций с разным физическим содержанием), то есть эти процессы являются многооперационными и разнооперационными. Опыт показывает, что сохранение технических решений, применявшихся в технологии ручного, неавтоматизированного производства, прямое копирование ручной технологии в автоматизированном процессе редко оказывается успешным. Обычно рождению автоматизированного производства предшествует глубокий пересмотр и направленное изменение содержания этих процессов.

Одним из примеров такого пересмотра технологических и конструктивных решений, которое привело в результате к автоматизации процесса получения отливок в сырых песчаноглинистых формах, является развитие способов уплотнения. Равномерное уплотнение формы (или, ещё лучше, оптимальное распределение плотности смеси в форме) является важным фактором, обеспечивающим качество отливки. Процесс прессования форм, позволявший сравнительно простыми средствами автоматически изготавливать литейные формы, первоначально позволял получать формы высотой не более 200 мм для сравнительно простых отливок, не требующих ручной подтрамбовки труднодоступных мест и применения моделей с отъёмными частями.

Поиск способа уплотнения, обеспечивающего высокое и равномерное уплотнение формы, продолжается уже около 100 лет. Можно

отметить основные этапы в этом поиске: применение профильных прессовых колодок (применимы для отливок простой формы при массовом, даже специализированном производстве), использование гибких диафрагм, многоплунжерных головок, предварительное уплотнение при пескострельном заполнении формы или высокочастотным встряхиванием, импульсные способы уплотнения. Эти работы существенно расширили область применения прессования и привели (в сочетании с повышением прочности форм и стержней, достигнутой при использовании новых формовочных материалов и связующих) к автоматизации процесса литья в песчаные формы.

Другой пример относится к процессу литья по выплавляемым моделям. Перед началом работ по его автоматизации был сделан принципиальный выбор между двумя возможными вариантами конструкции модельного блока. По первому варианту блок, состоящий из нескольких моделей и стояка, получался в виде плоской конструкции (отливки с питателями и стояк) в металлической форме с одним, как правило, разъёмом. Такое решение исключало последующую (трудно автоматизируемую в то время) операцию сборки блока. Но в этом случае на модельном блоке размещалось мало моделей, и удельный (на одну отливку) расход дорогостоящих материалов для оболочковой формы был большой.

Был принят второй вариант конструкции модельного блока в виде всем сейчас знакомой «ёлочки». Такой блок собирается из отдельных звеньев, каждое из которых состоит из нескольких моделей, соединённых питателями с общей втулкой. Эти звенья отливаются из модельного материала в металлической форме. Затем модельные звенья собираются в блок путём нанизывания их втулками на металлический стояк. На одном блоке помещается намного больше моделей, и удельный расход материалов, идущих на оболочковую форму, существенно сокращается.

Таким образом, в этом случае выбор был сделан в пользу менее автоматизированного процесса (сборка блоков производилась вручную), но процесс в целом стал более экономичным.

Ниже на ряде конкретных примеров показано использование различных технологических, конструктивных и организационных средств, наиболее часто применяемых для решения задач автоматизации литейного процесса и управления им.

Применение материалов с требуемыми свойствами

Использование в техпроцессе новых материалов с требуемыми свойствами (часто специальная разработка таких материалов) позво-

ляет сокращать количество операций или переходов или совмещать их. Иногда только использование нового материала с необходимыми свойствами позволяет создать автоматизированный процесс.

Бентониты

Применявшиеся при ручной и машинной формовке формовочные смеси были низкопрочными (для облицовочного слоя 50–65 кПа, для наполнительного 20–30 кПа), имели высокую влажность (около 5%) и были малопластичными. Формовка на таких смесях требовала уплотнения встряхиванием с подпрессовкой, а зачастую и ручной подтрамбовки некоторых зон опоки.

На первых автоматических формовочных машинах, работавших на таких смесях, не удавалось устойчиво получать годные формы.

Создать автоматизированный процесс получения сырых песчаных форм удалось только после введения нового связующего материала – бентонитовых глин. Они позволили получать формы с прочностью 120–140 кПа, а для горизонтально-стопочной формовки – даже до 200 кПа. Использование бентонитов в качестве связующих дало возможность получать формы с более высокими механическими свойствами, необходимыми для выполнения транспортных операций с ними, устранить встряхивание и ручную подтрамбовку, широко использовать прессование и формовку с использованием нижних опок без крестовин, создать процесс горизонтальной стопочной безопочной формовки. На старых смесях этот процесс был бы совершенно невозможен.

Синтетических смолы

Разработка синтетических смол в качестве стержневых связующих позволила автоматически выполнять транспортные операции с литейными стержнями и совместить изготовление и отверждение стержня на стержневой машине.

При ручном и механизированном изготовлении стержней на органических связующих применялась тепловая сушка стержней в сушиле. Автоматизировать ручную сборку – разборку стержневого ящика с большим количеством отъёмных частей и тепловую сушку стержней в драйерах (прочность сырого стержня очень низка) не представлялось возможным. Решение этой трудной задачи было найдено только при использовании связующих из синтетических смол. Они дают возможность проводить отверждение стержня непосредственно в стержневом ящике на стержневой машине за сравнительно короткое время.

Огнеупорные футеровочные материалы

Технология заливки форм из ручного ковша обычно требует быстрого заполнения литниковой системы за счёт большого расхода металла из ковша в первый момент заливки, с тем чтобы быстрее началось всплывание шлаковых частиц из металла, тогда и в полость формы шлака попадёт меньше. По мере совершенствования огнеупорных материалов для футеровки плавильных печей количество шлака в металле существенно уменьшилось, и в ряде случаев заливку удаётся автоматизировать и при постоянном расходе металла из ковша. Такой режим заливки при автоматизации этой операции получить гораздо проще.

Сохранение определённой ориентации объектов производства

Процессы литейного производства являются многооперационными и разнооперационными. Как правило, для выполнения каждой технологической операции требуется установка обрабатываемого изделия в какое-либо приспособление. При взятии этих предметов из неопределённого положения, например после их транспортировки «навалом», требуется новая автоматическая ориентация объекта производства, или же надо вводить ручную операцию. Только для деталей простейшей конфигурации автоматическая ориентация выполняется простыми механическими загрузочными устройствами (такие устройства иногда основываются и на других физических принципах). Обычно же требуется сложная техника с использованием систем технического зрения и роботов. До сих пор применение таких систем в литейных процессах носило экспериментальный характер.

Поэтому при создании многооперационного автоматизированного процесса важной задачей становится максимальное сохранение известной ориентации объектов производства (отливок и объектов технологического назначения, например опок, литейных форм, стержней) в технологическом процессе. Часто она сводится к передаче объекта производства по ходу технологического процесса с одного агрегата на другой без потери ориентации объекта в ходе транспортировки. Для этого используются различные конструктивные и технологические возможности.

На автоматических линиях формовки – выбивки формовочные машины, установки для сборки и разборки форм, их нагружения, заливки и выбивки соединяются транспортным средством – литейным конвейером. Опоки и литейные формы обычно позиционируются на транспортных устройствах при помощи направляющих штырей или других подобных элементов.

Машина ЛПД и обрубной пресс обслуживаются одним роботом, который захватывает извлекаемую из литейной формы отливку за литник, затем переносит её на контрольную позицию для проверки целостности (при извлечении отливки в форме могут остаться части отливки или литниковой системы, что при закрытии формы для следующего литейного цикла приведёт к поломке последней), после контроля помещает отливку в охлаждающий бак или душирующее устройство, а затем устанавливает её в обрубной штамп.

Изготовление отливок под давлением и ряд последующих операций иногда объединяются на одной технологической линии. На ней автоматически выполняются заливка и прессование отливки, контроль полноты выхода отливки из формы, обрубка отливки и некоторые простейшие операции механической обработки, например сверление. В состав линии входят дозатор, машина ЛПД, контрольное устройство, обрубной пресс и обрабатывающий станок. Все эти машины и механизмы объединяются транспортным устройством карусельного типа. В литейную форму перед её закрытием вводится штырь транспортного устройства, на котором и фиксируется получаемая отливка специальным технологическим приливом. В конце цикла обработки готовая деталь отделяется от технологического прилива, а последний снимается с транспортного штыря. Такая технология эффективна при сравнительно простой обработке отливок, когда в конце линии получается готовая продукция, и большой серийности, например в специализированном производстве.

Обрубка отливок под давлением, получаемых в многогнёздных литейных формах, производится в обрубных штампах, также многогнёздных. Для сохранения взаимного положения отдельных отливок в блоке, получаемым за один литейный цикл (иначе их не удастся одновременно обрубить в штампе), иногда увеличивается жёсткость этих блоков вводом технологических элементов – рёбер или стяжек, соединяющих отливки в блоке. Эти элементы удаляются при обрубке.

Процесс «автофордж» выполняется на карусельной четырёхпозиционной машине. На одной позиции получается отливка в металлической форме, на других производится её штамповка и обрубка. В кокильной форме на отливке формируются специальные приливы. Отливка посредством этих приливов закрепляется в карусельном транспортном устройстве и при помощи этого устройства переносится на другие позиции обработки (на которых она штампуется и обрезается).

В ряде случаев «фиксируется» не отливка, а конкретная литейная форма со всеми особенностями геометрии этой формы. Так, в литье под давлением наиболее рациональным вариантом является ис-

пользование комплектов оснастки (форма для литья под давлением и обрубной штамп), причём штамп налаживается именно под «свою» литейную форму. Попытки обрубать в одном штампе отливки от разных форм в случае достаточно сложных отливок или при точной обрезке часто оказывались неудачными.

Известна попытка объединения стержневого и формовочного автоматов в одну автоматическую линию. Полученный на стержневом автомате стержень извлекается из ящика роботом и без потери ориентации стержня устанавливается в литейную форму. Широкое применение такой системы сдерживается различной производительностью связываемых роботом автоматов.

Альтернативой принципу сохранения ориентации объекта на разных позициях обработки является использование принципа обрабатывающих центров, то есть закрепление объекта на одной позиции и выполнение над ним различных операций обработки. Например, в станке отливка устанавливается в кондуктор шлифовального станка один раз, и затем производится её полная обработка по нескольким поверхностям. В процессе обработки кондуктор перемещает отливку по двум осям (перемещение по третьей оси осуществляется шлифовальной головкой) и вращает её по заданной программе. При обработке такой отливки на нескольких позициях при каждой новой установке детали возникает дополнительная погрешность базирования, даже при использовании транспортных кондукторов с фиксацией деталей в них.

Использование объёмных методов обработки

Простейшими примерами объёмных методов обработки (методов, обеспечивающих «объёмное» воздействие на обрабатываемый объект) являются галтовка и дробемётная очистка, а также очистка гидравлическим ударом отливок, получаемых в жидкостекольных формах.

Известна также зачистка отливок литья под давлением методом «взрыва», когда в камере с отливками производится взрыв горючего газа, при этом сравнительно тонкий облой у этих отливок оплавляется.

Объёмные методы обработки не требуют ориентации обрабатываемого изделия.

Конструирование объектов с заданными динамическими характеристиками. Сваивание объектов

Характерным примером в этой области является создание автоматических заливочных установок. При заливке с регулированием

расхода по уровню металла в стояке стремятся уменьшить инерцию объекта регулирования. Поэтому применяют заливочные установки с заливочным зумпфом, в котором поддерживается постоянный уровень металла, а расход регулируют стопором. При этом стремятся обеспечить минимальную длину струи между стопором и литниковой чашей.

Температурное поле в металлической форме имеет сложное распределение. Такой параметр в теории автоматического управления классифицируется как распределённый. Неравномерность температурного поля вызывает деформацию и коробление формы, снижает точность получаемой отливки. Деформация формы возрастает примерно пропорционально квадрату линейного размера формы, поэтому использование больших форм (для отливок с размерами свыше 200–250 мм) при изготовлении их формообразующих вкладышей из одного куска металла приводит к сильному искажению геометрии отливки, большим припускам на обработку, а иногда и просто к невозможности эксплуатировать такую форму. Сформировать приемлемое распределение температуры в форме средствами автоматического регулирования температуры (раздельным нагревом или охлаждением разных частей формы) обычно не удаётся. Одним из решений этой трудной задачи явилось изготовление формообразующего вкладыша из нескольких частей, что резко уменьшило деформацию формы и повысило точность отливки.

К необходимости «сдваивания» технологических установок приводит следующая ситуация. Многие процессы литейного производства цикличны, поэтому производимая продукция может использоваться только через некоторое время после начала его выполнения. Другие же процессы, связанные с первыми, требуют непрерывной подачи материалов или изделий. Так, процесс литья в металлические формы требует постоянной температуры формы и, следовательно, непрерывной работы литейной машины. Плавка металла и обработка жидкого металла – рафинирование и модифицирование (её желательно выполнять непосредственно в раздаточной печи и быстро использовать этот металл) – процессы периодические.

Решение этой и подобных проблем часто идёт путём сдваивания технологических установок. Пока в одной из них выполняется требуемый технологический процесс (например, проводится обработка жидкого металла), другая обеспечивает следующие по ходу процесса операции материалами или объектами производства. Так, обычными решениями является плавка металла в нескольких печах, выпускающих металл со смещением по времени. Для обслуживания кокильных

установок используются двухтигельные раздаточные печи. В одном тигле производится обработка металла, а из другого происходит разливка. При этом используется автоматическое заливочное устройство, специально предназначенное для работы на такой раздаточной печи. Оно периодически переустанавливается с одного тигля раздаточной печи на другой и без перерывов производит заливку форм на карусельной кокильной машине.

Часто таким путём проводится подготовка материалов в какой-либо ёмкости перед его подачей в непрерывный технологический процесс.

Стабилизация возмущающих воздействий

Некоторые возмущающие воздействия, влияющие на результат технологического процесса, трудно или вообще невозможно устранить средствами автоматического управления. Причины этого – сложность или отсутствие соответствующих регуляторов и оперативных методов измерения этих возмущений, а также значительные затраты времени на их устранение. К таким возмущениям относятся, например, значительные колебания состава металла и формовочной смеси. Часто влияние подобных возмущений удаётся устранить их стабилизацией конструктивными или организационными средствами. Можно привести некоторые примеры таких решений:

1. Раздельное хранение материалов одного и того же назначения, но с несколько отличающимися свойствами. При использовании новых партий таких материалов производится подналадка соответствующего оборудования.

2. Применение специальных установок или транспортных систем для выравнивания состава оборотной формовочной смеси.

Таковы некоторые примеры технологических, конструкторских и организационных решений, которые обеспечили (по крайней мере, во время появления таких решений) возможность автоматизации литейных технологических процессов и автоматическое управление ими.

§ 2. Основные понятия автоматического управления

Системой называется совокупность элементов, находящихся в отношениях и связях друг с другом, которая образует определенную целостность, единство. Под связями здесь понимают взаимодействие каких-либо объектов во времени. Можно выделить биологические, общественные, технические, производственные и др. системы. Системами являются, например, система кровообращения и живой орга-

низм в целом, организация какого-либо производства и т.д. *Технические системы* состоят из технических устройств: деталей, узлов, механизмов, машин и т.п. Примерами технических систем являются автомобиль, его система зажигания или отдельная катушка зажигания. Среди технических систем можно назвать системы технологического назначения, которые предназначены для изготовления каких-либо изделий из исходных материалов, другими словами, для выполнения какого-либо технологического процесса или его части: механизм прессования формовочной машины, формовочная машина в целом, автоматическая линия формовки-выбивки.

Технологическим процессом называют совокупность действий, направленных на изменение размеров, формы, свойств, положения или местонахождения объекта производства.

Технологический процесс разбивают на ряд технологических операций, выполняемых в определенной последовательности.

Операцией называют законченную часть технологического процесса, которую выполняет определенная машина или механизм.

В литейном производстве принято различать технологические процессы приготовления смеси, изготовления форм, стержней, плавки металла и т.д. Примерами технологических операций являются: изготовление полуформы, сборка формы, изготовление, сушка, склейка и окраска стержня, выбивка и т.д.

В зависимости от целей анализа в состав технологической системы может быть включен или не включен объект производства. Поскольку целью создания и функционирования технологической системы является получение определенной продукции, мы в дальнейшем, как правило, будем включать объект производства в состав технической системы и рассматривать их совместно.

Величины, характеризующие выполнение какого-либо процесса (или функционирование соответствующей системы, выполняющей этот процесс), называются *выходными параметрами* этого процесса (или выходами этой системы). Если выделить часть процесса, например операцию, то для нее также можно указать выходные параметры. Например, выходными параметрами процесса плавки являются: температура сплава, его химический состав, производительность; выходными параметрами операции изготовления полуформ – ее плотность и твердость, газопроницаемость, отсутствие или наличие подрывов и т.д.

Техническая система в ходе выполнения заданного процесса подвержена различным внешним воздействиям, которые влияют на процесс и, следовательно, на выходные параметры процесса (системы). Эти воздействия называются *входными воздействиями*, или

входными параметрами. Например, на результат прессования формы влияют состав и влажность формовочной смеси, на температуру чугуна – расход кокса и содержание в нем углерода, расход дутья.

Наличие внешних воздействий, влияющих на выходные параметры процесса, приводит к необходимости управления процессом (системой).

Управлением называется такая организация того или иного процесса, которая обеспечивает достижение определенных целей. Управление технологическим процессом представляет такую организацию его выполнения, которая обеспечивает изготовление качественной продукции при заданном (или оптимальном) расходе материалов и заданных условиях эксплуатации оборудования.

Любое управление строится на основе анализа информации о состоянии объекта управления, сопоставления этой информации с целями управления и формирования по результатам такого сопоставления управляющих воздействий.

Произвести управляющее воздействие на объект управления возможно, изменяя значение одного или нескольких входных параметров этого объекта. Например, для достижения требуемой твердости полуформы при ее прессовании в качестве управляющего воздействия из числа входных воздействий могут быть выбраны изменение хода прессового поршня или давление в цилиндре прессования.

При выборе вида управляющих воздействий руководствуются следующим:

– должны быть технические средства для целенаправленного изменения величины этого воздействия;

– управляющее воздействие должно влиять на изменение соответствующих выходных параметров в необходимом, достаточно широком диапазоне;

– его изменение не должно существенно снижать характеристик производительности, экономичности и т.п.

Входные воздействия, не используемые для оказания управляющих воздействий на объект управления, называются возмущающими воздействиями. Среди них можно выделить контролируемые и неконтролируемые воздействия. К контролируемым возмущающим воздействиям относятся те, значения которых измеряются; следовательно, величина этих воздействий может быть учтена при выработке управляющих воздействий. К неконтролируемым возмущающим воздействиям относятся такие воздействия, величина которых не измеряется, например, из-за отсутствия соответствующих технических средств.

Управление может осуществляться человеком (оператором) неавтоматическими средствами или автоматически.

Автоматическое управление – это совокупность действий, направленных на поддержание и улучшение функционирования управляемого объекта, без непосредственного участия человека, в соответствии с заданной целью управления.

При автоматическом управлении все функции управления выполняются управляющим устройством. На рис. 1.1 показана связь объекта управления и автоматического устройства управления. Здесь *ОУ* – объект управления; *УУ* – устройство управления; *Y* – вектор выходных параметров; X_1, X_2, X_3 представляют соответственно управляющие параметры, контролируемые и неконтролируемые входные воздействия (параметры). Необозначенными стрелками показаны потоки информации, поступающие к *УУ*, и управляющие воздействия на *ОУ*.

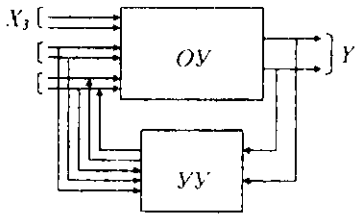


Рис. 1.1

В некоторых случаях непосредственно контролировать требуемый выходной параметр невозможно. Например, отсутствуют средства для контроля структуры металла отливки в процессе ее отжига, трудно контролировать твердость песчаной формы в момент ее прессования и т.д. В таких случаях управление ведут по косвенному показателю, то есть выбирают какую-нибудь другую физическую величину, связанную с заданным выходным параметром и контролируемую имеющимися средствами. Контролируя эту величину (которая и называется косвенным показателем), можно судить о значении интересующего нас выходного параметра. Примером использования косвенного показателя является управление процессом прессования песчаной формы. Известно, что плотность формы зависит от величины давления в цилиндре прессования формовочной машины. Поэтому при наладке процесса находят величину давления, при котором плотность достигает заданного значения. Затем при автоматическом управлении работой формовочной машины прессование формы продолжают до тех пор, пока давление в цилиндре прессования не достигнет этой величины. Часто в качестве косвенного показателя принимается время выполнения процесса или операции, например при термообработке отливок, при приготовлении формовочной смеси в смесителях.

Управление по косвенному показателю может привести к большим ошибкам, если на него, помимо соответствующего выходного параметра, существенно влияют какие-либо другие факторы (возмущающие воздействия), меняющиеся в ходе процесса. Например, в приведенном выше примере при изменении состава или влажности формовочной смеси требуемая плотность может быть не получена. Поэтому стремятся выбирать такие косвенные показатели, которые мало зависят от возмущающих воздействий.

Взаимодействующие *ОУ* и *УУ* образуют обычно достаточно сложные системы, в которых *УУ* решает различные задачи управления. В технических системах литейного производства большое число задач управления сводится к управлению циклом технологической машины и к регулированию технологических параметров.

Ряд других задач управления и методы их решения описаны в главе 8.

§ 3. Элементные базы систем управления

Для управления объектами литейного производства применяются системы управления с различной элементной базой. *Элементной базой* называется набор элементов (или аппаратов), имеющих такие характеристики, которые обеспечивают их совместное использование для построения функционально законченных систем (например, систем управления технологическим оборудованием, измерительных приборов, вычислительных устройств и др.).

Релейно-контакторная аппаратура

Исторически первыми возникли системы релейно-контакторного управления. Эти системы выполняют задачи управления в основном путем замыкания и размыкания электрических контактов. Обычно они рассчитаны на напряжение 110 или 220 В переменного тока, реже на 12 или 24 В постоянного тока.

Недостатком этих систем является ограниченный срок службы аппаратов (500 тыс. – 5 млн. срабатываний, таким образом, их ресурс может быть выработан за 1–1,5 года работы), значительная инерционность и пониженная надежность в условиях литейного цеха (отказы при загрязнении контактов). Кроме того, она, в отличие от программных систем, является «жёсткой», то есть для внесения каких-либо изменений в работу системы управления необходимо переделывать её конструкцию.

Основными аппаратами релейно-контакторного управления являются тяговые электромагниты, контакторы, промежуточные реле, кнопки управления, выключатели и переключатели, путевые и конеч-

ные выключатели, а также различные реле (времени, тока, напряжения, давления, скорости).

Тяговые электромагниты применяют для дистанционного управления контакторами, вентилями, кранами и задвижками в пневмо- и гидроцепях, в зажимных и тормозных устройствах и в других случаях, когда требуется быстрое перемещение рабочих органов на небольшое расстояние.

Контактор представляет собой электрический выключатель и предназначен для дистанционного включения, выключения и переключения электрических силовых цепей переменного и постоянного тока. Он имеет электромагнитный привод.

Промежуточные реле предназначены для коммутации (соединения, переключения) цепей управления. По принципу действия они аналогичны контакторам, но имеют большое число замыкающих и размыкающих контактов, рассчитанных на токи управления (то есть токи небольшой величины).

Кнопки управления предназначены для ручного замыкания и размыкания электрических цепей. Они имеют электрические контакты и шток с кнопкой для ручного воздействия. Обычные кнопки (без фиксации) после прекращения воздействия возвращаются в исходное положение.

Выключатели и переключатели имеют несколько фиксированных положений, в которых они замыкают различные сочетания контактов.

Путевые и конечные выключатели имеют электрические контакты и привод (рычаг или шток). Контакты переключаются при воздействии на привод движущегося механизма. Таким образом получают сигнал о местонахождении механизма, например, в конце выполнения какого-либо перехода.

Реле времени – аппарат, выдающий собственный сигнал (например, в виде замыкания контакта) через определенный, заранее заданный промежуток времени после поступления сигнала на его вход. Широко применяются моторные и электронные реле времени. Моторное реле имеет электродвигатель; при включении реле он начинает вращаться и поворачивает рычаг, который после поворота на некоторый угол переключает электрические контакты. Моторные реле времени обеспечивают выдержки от 0,5 до 5, 10, 15 мин и т.д., максимально до 24 ч.

Электронные реле времени для задержки сигнала используют время зарядки или разрядки конденсатора. Они обеспечивают выдерж-

ки от долей секунды до нескольких минут. Цепь питания электронного реле остается включенной во время работы системы управления.

Реле времени могут иметь следующие типы выходных контактов: замыкающие с выдержкой времени при замыкании или при размыкании; размыкающие с выдержкой времени при замыкании или при размыкании; кроме того, они могут иметь и обычные, то есть срабатывающие без выдержки времени, контакты.

Реле тока, напряжения, давления, скорости и др. имеют контакты, которые замыкаются (или размыкаются) при определенных, задаваемых настройкой, значениях тока, напряжения и т.д. Они служат для подачи управляющему устройству соответствующих сигналов, например о наличии или отсутствии необходимого тока, напряжения и т.п.

Сложной задачей для релейно-контакторного управления является выполнение алгоритмов непрерывного (аналогового) управления. Один вариант решения этой задачи связан с использованием механической (часто с использованием червячного редуктора) передачи. Например, такие приводы часто применяются для управления регулирующими клапанами, поворотными заслонками, шиберами, регулирующими реостатами.

В другом варианте непрерывный алгоритм управления заменяется ступенчатым. Например, пуск асинхронных двигателей с фазовым ротором осуществляется с помощью пускового реостата, представляющего собой несколько ступеней постоянных сопротивлений (резисторов), которые по мере разгона двигателя последовательно выводятся из цепи обмотки ротора.

В машинах литья под давлением одно время регулирование скорости выполнялось группой из пяти параллельно включённых распределителей (переключающих, не регулирующих) с разной пропускной характеристикой. Включение разных комбинаций этих распределителей позволяло регулировать скорость с шагом в 3% от разности между максимальным и минимальным значением скорости.

Бесконтактная аппаратура

Бесконтактная аппаратура свободна от ряда недостатков релейно-контакторной аппаратуры: она имеет практически неограниченный срок службы, неограниченное число переключений (в силовых устройствах до 20 млн. переключений), надежна в работе, безинерционна. Верхний допустимый предел температуры может быть ограничен (60 или 80°С).

В бесконтактных системах автоматического управления функции контакторов выполняют бесконтактные переключающие устройства на тиристорах, функции реле – логические элементы, функции аппаратов управления (кнопок управления, конечных выключателей) – бесконтактные кнопки, бесконтактные переключатели и т.п. По принципу действия бесконтактные аппараты делятся на магнитные, транзисторные и тиристорные. Первые два типа имеют небольшую мощность и используются, в основном, в цепях управления.

На основе полупроводниковых приборов – тиристоров и симисторов – изготавливаются бесконтактные тиристорные пускатели, электронные устройства плавного пуска, частотно регулируемые приводы на основе асинхронных двигателей.

Бесконтактные путевые переключатели по принципу действия могут быть индуктивные, трансформаторные, генераторные, основанные на эффекте Холла, магнитоуправляемые и др.

Пневматические и гидравлические средства автоматики

В пневматических средствах автоматики информативными и управляющими сигналами служит воздух со стандартным диапазоном изменения давления 0,02–0,1 МПа. Автоматические системы используют универсальную систему элементов промышленной пневмоавтоматики (УСЭППА). Основными элементами УСЭППА являются постоянные и переменные дроссели, ёмкости, повторители, элементы сравнения, логические элементы, усилители, реле. Эти элементы монтируются на платах из органического стекла и соединяются разводкой пневматических каналов, через которую осуществляется связь элементов. Различные устройства управления (регуляторы непрерывного или дискретного действия, релейные схемы, оптимизирующие устройства и др.) создавались коммутацией пневмоэлементов универсального назначения.

Пневматические средства автоматики пожаро- и взрывобезопасны. Они надёжно работают при более высоких температурах, чем контактные и бесконтактные электрические средства автоматики, поэтому применялись для автоматического управления кокильными машинами.

Средства пневмоавтоматики более инерционны, чем электрические, имеют плохую помехоустойчивость.

Программное управление на базе вычислительной техники

При таком управлении все или основные задачи управления решаются программно вычислительным устройством. В ряде программных устройств программу можно изменить, в других – ввести в неё необходимые для настройки параметры. Отпадает необходимость изготавливать и использовать большое количество аппаратов (реле, логических элементов и др.) с «жёсткими» соединениями (электрическими или пневматическими) между ними для решения логических и вычислительных задач, можно решать весьма сложные задачи управления. Однако получать информацию от объекта управления и реализовывать управляющие воздействия необходимо посредством устройств, использующих рассмотренные выше элементные базы.

§ 4. Дискретная автоматика. Управление циклом технологической машины

Дискретные цикловые системы управления

Под устройством релейного (дискретного) действия или дискретным автоматом понимают устройство, перерабатывающее или распределяющее по заданной программе информацию, поступающую и выдаваемую в виде дискретных сигналов.

Теория дискретных автоматов решает задачи получения структуры релейного устройства по заданным для неё условиям работы (например, циклограммам, таблицам включений, заданной последовательности во времени срабатывания элементов устройства и т.д.).

Среди элементов дискретного действия наиболее распространены: контактные и бесконтактные конечные включатели, электромагнитные реле, электронные ключи, пневматические элементы и др.

Проектирование дискретной цикловой системы управления начинается с циклограммы работы проектируемого устройства (именно с циклограммы работы механизмов, а не циклограммы исполняемого технологического процесса).

На основании циклограммы формулируют требования к работе устройства, записывают порядок его действия. Обычно описание работы системы «объект управления – устройство управления» записывается в виде алгоритма его работы в виде перечня предписаний, указывающих содержание и последовательность выполняемых операций. Для описания работы устройства управления составляют логическую схему алгоритма (ЛСА) или эквивалентную ей граф-схему алгоритма

управления. Затем ЛСА подвергают специальной обработке, составляют таблицу включений и т.д., в результате чего получают искомую релейную схему.

Автоматизированное управление приводом

Первоначально автоматизированное управление приводом разрабатывалось с использованием единственной в то время релейно-контакторной аппаратуры. В настоящее время она еще широко применяется.

Исполнительные органы литейных машин обычно приводятся в действие асинхронными двигателями, пневмо- и гидроцилиндрами. Помимо них требуется также управлять различными нагревательными устройствами, обеспечивать подачу разных жидкостей и газов. Для управления этими механизмами и устройствами (их включения и выключения в соответствии с циклограммой) часто используют устройства с электромагнитным приводом: контакторы, распределители, запорные клапаны.

Контактором называется электрический выключатель дистанционного действия с электромагнитным приводом. Он имеет (рис. 1.2,а) сердечник *1*, подвижный якорь *2*, электрическую катушку *3*, возвратные пружины *4*. На пластине *5*, связанной с якорем, закреплены подвижные контакты *6*, а на корпусе прибора – неподвижные контакты *7*. При пропускании тока через катушку *3* якорь притягивается к сердечнику, и контакты замыкаются.

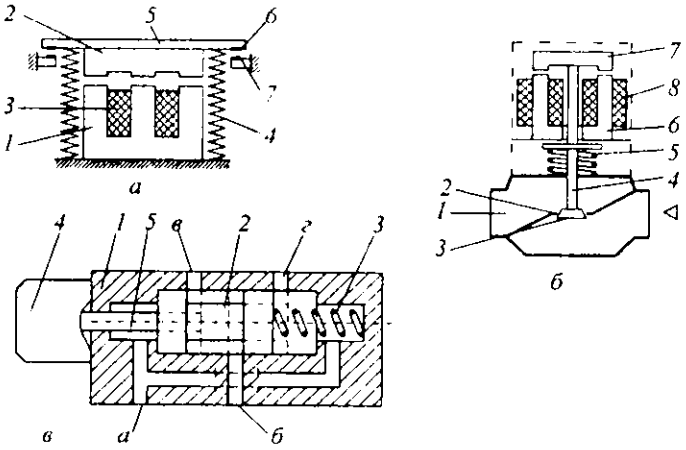


Рис. 1.2

При прекращении тока в катушке якорь отжимается возвратными пружинами в исходное положение, и контакты размыкаются. На контакторе может быть несколько пар контактов, причём некоторые из них замыкаются при включении контактора, другие же размыкаются.

В контакторах различают главные и вспомогательные контакты. Главные контакты служат для замыкания силовых цепей, по которым идут большие токи к основному потребителю электроэнергии: электродвигателю, нагревателю и т.п. Вспомогательные контакты служат для переключения цепей управления, по которым идут сравнительно небольшие токи.

На электрических схемах контакты контакторов и других устройств изображаются в нормальном положении, то есть при отсутствии тока в катушке соответствующего аппарата.

Контакторы различаются по роду тока в катушке (постоянный или переменный), по напряжению катушки, по номинальному току через главные контакты.

Запорный клапан с электромагнитным управлением (рис. 1.2,б) имеет корпус *1* с седлом клапана *2*, клапан *3* со штоком *4*, возвратную пружину *5* и электромагнит, состоящий из сердечника *6*, якоря *7* и катушки *8*. При пропускании тока через катушку якорь притягивается к сердечнику, и связанный с ним шток открывает клапан. Такой клапан применяется для дистанционного или автоматического управления трубопроводами подачи жидкостей и газов.

Существуют также запорные клапаны с электрическим приводом, состоящим из электромотора, редуктора и датчиков, контролирующих конечные положения клапана.

Распределитель служит для переключения потоков жидкостей и сжатого воздуха в гидравлических и пневматических приводах. Одна из конструкций распределителя показана на рис. 1.2,в. Распределитель имеет корпус *1*, в котором может перемещаться цилиндрический золотник *2*, пружину *3* и электромагнит (соленоид) *4* со штоком *5*. В нормальном состоянии (когда в катушке электромагнита нет тока) пружина удерживает золотник в левом конечном положении. При этом соединены каналы (ходы) *а* - *г* и *б* - *в*. При включении электромагнита его якорь втягивается и штоком перемещает золотник в правое конечное положение. При этом соединяются каналы *а* - *в* и *б* - *г*. Такой распределитель называется двухпозиционным (он имеет два фиксированных положения) и четырехходовым (имеет 4 хода: *а, б, в, г*).

В связи с известными недостатками релейно-контакторного управления (ограниченный срок службы, низкая надёжность из-за засорения контактов, резкие броски тока при включении) для включе-

ния электродвигателей всё шире используются бесконтактные средства управления. Для управления различными двигателями, в том числе и асинхронными, используются бесконтактные тиристорные пускатели.

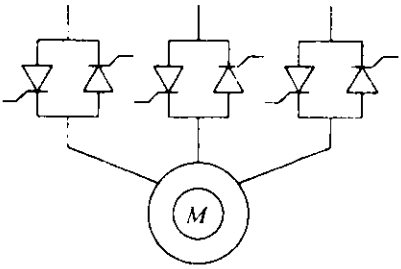


Рис. 1.3

На рис. 1.3 представлена схема, поясняющая принцип тиристорного управления асинхронным двигателем. Функцию контактора тиристоры выполняют, работая в так называемом ключевом режиме, для которого характерными являются два состояния: полностью (т.е. в течение целого полупериода) открытые или полностью закрытые. На схеме в каждую фазу статора включены по встречно-параллельной схеме два тиристора. Один из них пропускает ток в положительный полупериод, а другой – в отрицательный. Для включения двигателя подаются отпирающие импульсы на управляющие электроды тиристоров. Для остановки двигателя отпирающие импульсы с тиристоров снимаются, последние запираются и тем самым отключают двигатель от сети.

Сейчас широко применяются тиристорные пускатели, а также разработанные на их основе устройства плавного пуска асинхронных двигателей. Они обеспечивают плавный пуск механизмов, включаемых под нагрузкой, приводов с механическими передачами, механизмов с большими моментами инерции, конвейеров, вентиляторов и компрессоров. Устройства плавного пуска снижают электрическую нагрузку на питающую подстанцию, уменьшают пусковые токи, увеличивают срок службы двигателя. Устройства плавного пуска позволяют осуществлять энергосберегающий режим (напряжение на асинхронном двигателе изменяется в соответствии с колебаниями нагрузки) и режим с ограничением пускового тока.

Широкое применение получили системы регулирования на основе асинхронного двигателя с частотным регулированием.

Циклограммы

Технологическая машина выполняет какую-либо операцию технологического процесса. Технологические операции делятся на переходы.

Переходом называют законченную элементарную часть операции, выполняемую при срабатывании одного или нескольких взаимосвязанных исполнительных органов машины или механизма. Формо-

вочный автомат, например, выполняет следующие переходы: продвижение опоки на позицию заполнения формовочной смесью; опускание опоки на модельную плиту; раскрытие створок дозатора смеси; засыпка смеси в опоку и т.д.

Процесс функционирования технологической машины является циклическим. Циклическим называют процесс, состоящий из повторяющихся последовательно операций или переходов. Цикл – это период времени, в который происходит вся последовательность операций (переходов) циклического процесса.

Взаимодействие механизмов сложной машины при выполнении циклического процесса представляется посредством *циклограмм*, описывающих работу *механизмов* машины. *Циклограмма* – это графическое изображение последовательной смены состояний машины во времени. Поскольку машина состоит из отдельных механизмов, то циклограмма должна показывать изменение состояния (в простейшем случае - изменение положения в пространстве) этих механизмов.

Циклограммы обычно строятся в виде таблицы (рис. 1.4), в которой по вертикали перечисляются механизмы машины, а по горизонтали откладываются длительности последовательно выполняемых переходов. Помимо времени, здесь могут указываться названия переходов, выполняемых механизмами в это время.

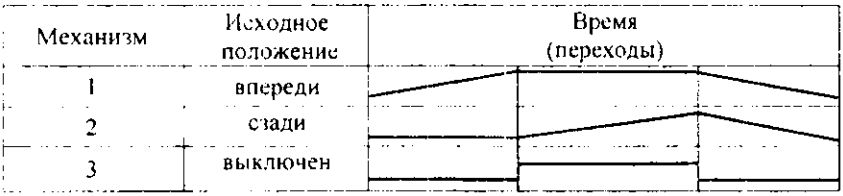


Рис 1.4

Строки, расположенные напротив наименования каждого механизма, используются для упрощенного графического изображения состояния соответствующего механизма. Например, если механизм имеет два конечных состояния (толкатель втянут - вытянут, электродвигатель включен – выключен, клапан открыт – закрыт), то нахождение механизма в одном из этих состояний изображается горизонтальной линией, расположенной в нижней части соответствующей строки. Альтернативное состояние изображается горизонтальной линией, расположенной в верхней части этой строки. Переход механизма из одного состояния в другое изображается наклонной прямой.

Расстояние по горизонтали между начальной и конечной точками этой наклонной соответствует времени, которое требуется для перехода механизма из одного состояния в другое. Если этот переход происходит очень быстро (практически мгновенно), то и линия, изображающая состояние механизма, скачком переходит из одного положения в другое (сверху вниз или наоборот). Одно из конечных состояний механизмов, в которых они находятся перед началом очередного цикла работы, называется исходным. Обычно оно также указывается на циклограмме.

На циклограмме могут также изображаться элементы управления, которые определяют момент окончания какого-либо перехода, например, конечный выключатель или реле времени.

Для примера на рис. 1.5 показана схема выбивной установки, состоящей из вибростола *3*, толкателя *1*, сталкивающего форму с тележки литейного конвейера *4* на вибростол, и толкателя *2*, сталкивающего выбитую опоку с вибростола на транспортер *5*.

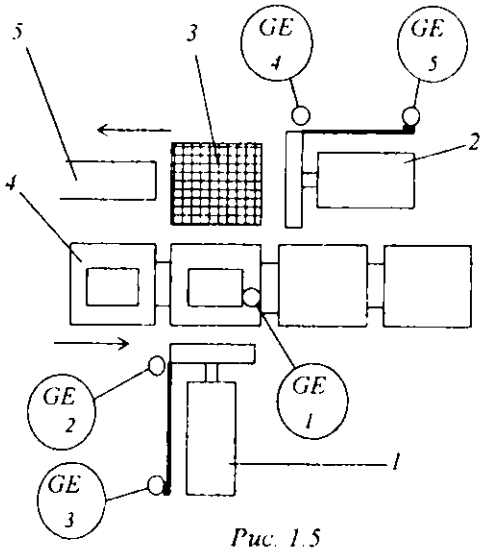


Рис. 1.5

Работа этой установки описывается циклограммой, показанной на рис. 1.6. В момент времени *0* толкатель *1* начинает движение, сталкивая форму на вибростол. В момент времени *1* толкатель заканчивает выполнение перехода. При этом включается вибростол, а толкатель *1* начинает движение в исходное положение. В момент времени *2* выбивка заканчивается. Вибростол выключается, а толкатель *2* начинает

движение, сталкивая опоки на транспортер. В момент времени *3* толкатель *2* заканчивает сталкивание опок и начинает обратный ход, который заканчивается в момент времени *4*.

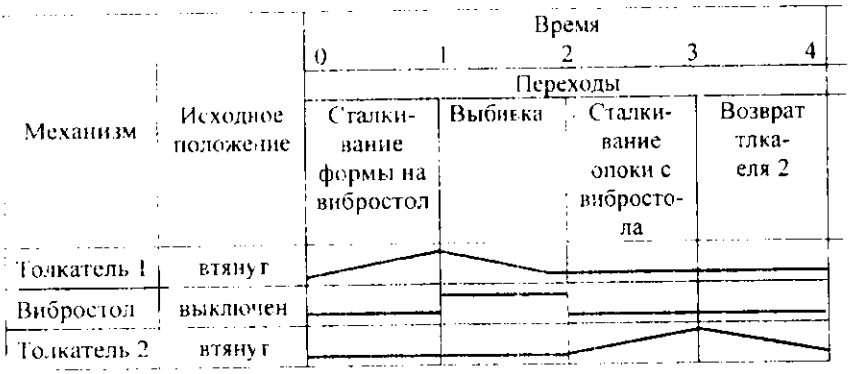


Рис. 1.6

Таким образом, рассмотренная установка выполняет следующие переходы: *1* – рабочий ход толкателя *1*; *2* – обратный ход толкателя *1*; *3* - выбивка; *4* – рабочий ход толкателя *2*; *5* – обратный ход толкателя *2*. Выходными параметрами переходов являются: положения толкателей (в переходах *1, 2, 4, 5*) и качество выбивки (наличие или отсутствие смеси в опоке) для перехода *3*.

Сокращение длительности цикла

В некоторых случаях можно сократить время цикла, если конструкция машины позволяет не дожидаться окончания очередного перехода, а начать следующий раньше, если это не приведёт к поломке механизмов или другим неисправностям. Например, для установки, показанной на рис. 1.5, следующий цикл можно начать ещё во время обратного хода толкателя *2*, но при этом сдвигаемая с конвейера форма не должна столкнуться с ним. Для этого необходимо контролировать момент, когда толкатель *2* находится уже в безопасном положении (дополнительным конечным выключателем, установленным между *GE 4* и *GE 5*).

Для сокращения длительности цикла используются специальные конструктивные решения. Например, толкатель *2* (см. рис. 1.5) можно выполнить так, как это показано на рис. 1.7.

Упор толкателя выполнен откидывающимся. Тогда при рабочем ходе толкателя (влево) он столкнёт опоки на транспортёр. Обратный

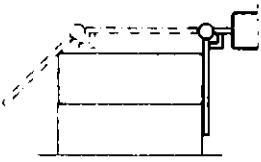


Рис. 17

ход толкателя может быть сделан уже после установки на вибростол следующей формы. Упор тогда откинется и пройдёт над выбиваемой формой. Такая конструкция позволяет сократить цикл установки на время обратного хода толкателя 2.

Особенности циклограмм некоторых установок

Установки непрерывного действия, транспортные системы, многодвигательные и энергоёмкие установки имеют некоторые особенности в своих циклограммах.

Установки непрерывного действия – это установки, которые в течение длительного времени (смены, суток и т.д.) работают непрерывно. Примерами таких установок являются проходные очистные барабаны, смесители непрерывного действия, установки для обработки оборотной формовочной смеси, системы конвейерного транспорта.

Циклом работы таких установок считают время от запуска установки или транспортной системы в работу до её остановки, а циклограмма представляет, соответственно, изменение состояния отдельных элементов системы в это время.

При составлении циклограммы таких установок или систем учитывается следующее.

В узлах перегрузки транспортируемого материала последний не должен скапливаться. Сначала должен включаться элемент системы, последующий по ходу технологического процесса (например, конвейер, удаляющий отливки от узла перегрузки), а затем – предыдущий (например, конвейер, подающий их к узлу перегрузки). В противном случае возможны нарушения нормального хода процесса (например, выход из строя узла перегрузки из-за переполнения, перегрузка транспортёра). Тогда начальная часть циклограммы системы должна иметь вид, показанный на рис. 1.8.

Механизм	Исходное состояние	Время
Транспортёр 1	выключен	
Транспортёр 2	выключен	
Транспортёр 3	выключен	τ

Рис. 1.8

Здесь материал поступает в транспортную систему на транспортёр *1*, с него – на транспортёр *2*, и выдаётся из неё транспортёром *3*. Во избежание скопления материала в каком-либо узле системы сначала следует включить транспортёр *3*, после начала его нормальной работы включить транспортёр *2*, а затем – транспортёр *1*. За время τ включённый механизм должен войти в нормальный режим работы.

Иногда необходимо в конце работы освободить транспортную систему или установку от транспортируемого или обрабатываемого материала. Тогда выключение механизмов должно производиться в обратном порядке - от начала технологической цепочки к её концу, причём интервалы времени между отключением механизмов должны быть достаточными для освобождения выключаемого механизма от обрабатываемого или транспортируемого материала.

При составлении циклограмм многодвигательных установок учитывается следующее. Одновременное включение всех приводов установки вызовет большой пусковой ток, что приведет к понижению напряжения в питающей сети, к остановке соседних установок и ухудшению освещённости рабочих мест. Поэтому приводы таких установок включаются, как правило, последовательно, с интервалами времени, достаточными для разгона очередного включаемого двигателя.

Включение энергоёмких установок производится таким образом, чтобы максимально снизить пусковой момент (снизится пусковой ток и уменьшится падение напряжения). Например, смеситель с приводом, состоящим из электродвигателя и редуктора, соединённых муфтой, включается без нагрузки (чаша смесителя пустая). Сначала включается только двигатель. Затем после разгона двигателя включается муфта, и начинает раскручиваться весь привод (двигатель, редуктор и катки смесителя). Только после раскручивания всего привода в смеситель начинает подаваться формовочная смесь.

Задачи управления циклом

Для нормального функционирования машины и выполнения требуемого технологического процесса все необходимые переходы должны обязательно и полностью выполняться, причем в определенной последовательности, задаваемой технологическим процессом и конструкцией машины. Это обеспечивается управляющим устройством машины. Таким образом, задачи управления циклом работы технологической машиной сводятся к следующим:

1. Своевременное начало перехода и его завершение.
2. Обеспечение заданной последовательности переходов.

В некоторых случаях встречаются более сложные задачи управления, например, регулирование скорости привода по заданному закону. Их решение рассмотрено в других разделах.

Для того чтобы управляющее устройство могло правильно выполнить свою задачу, оно должно получать информацию о том, что выполняемые переходы завершены, а для начала следующего перехода сложились необходимые условия.

Каждый переход начинает выполняться при включении *привода* соответствующего рабочего органа. Рабочие органы литейных машин обычно приводятся в действие *электродвигателями, пневмо-* или *гидроцилиндрами, силовыми электромагнитами*. Потоки газов и жидкостей включаются и выключаются *запорными клапанами*. Для включения и выключения электродвигателей, а также нагревателей используются *контакторы, магнитные* или *тиристорные пускатели*. Гидравлические и пневматические цилиндры управляются *распределителями*, запорные клапаны – *электромагнитами*. Именно этим аппаратам система управления и должна послать сигналы на включение или отключение соответствующего привода. При использовании тиристорных пускателей или устройств плавного пуска команды управления должны подаваться на входы этих устройств. Кроме того, часто при включении приводов рабочих органов используется ряд других механизмов и аппаратов (муфты, реле времени и др.), которыми также надо управлять.

Иногда помимо включения и выключения аппараты управления должны выполнять некоторые задачи регулирования (например, регулирование скорости). В таких случаях используются более сложные устройства, например *регулирующие клапаны* и *дроссельрующие распределители*, которые будут рассмотрены в других разделах.

Проверку состояния механизмов машины и внешних условий выполняют *датчики*.

Для управления взаимными перемещениями механизмов машины применяются *датчики положения*, в качестве которых обычно используются *путевые переключатели (конечные выключатели)* различных типов. Путевой переключатель представляет собой аппарат, фиксирующий определённое положение движущегося элемента машины и вырабатывающий при этом сигнал. В зависимости от вида системы управления применяется переключатель, выдающий электрический, пневматический или гидравлический сигнал.

Непосредственный контроль многих технологических процессов весьма затруднён. В таких случаях выполнение процесса часто контролируется по времени. Основным аппаратом автоматического

управления по времени является реле времени – аппарат, выдающий собственный выходной сигнал через определённый промежуток времени после поступления в него входного сигнала.

Для проверки множества других условий, которые должна учитывать система управления при выработке управляющих воздействий, применяются различные датчики и реле, а возможно, и сигналы различных приборов. Например, используются сигналы от датчиков давления, температуры, скорости, тока и т.д. Различные типы датчиков описаны в следующих разделах.

Ручное управление приводами выполняется кнопками управления. Существуют электрические (подают электрическое напряжение к управляемому элементу), пневматические и гидравлические кнопки.

Работу управляющего устройства удобно описать алгоритмом управления или эквивалентной ему граф-схемой алгоритма.

Граф-схема алгоритма управления

Для разработки системы управления какого-либо устройства прежде всего необходимо сформулировать требования к его работе и записать порядок его действия.

Требования к устройству и порядок его функционирования можно записать в различных формах. Наиболее общей из них является запись алгоритма работы устройства в виде перечня предписаний, указывающих содержание и последовательность операций, которые должен выполнить объект управления.

При составлении алгоритма следует выделить в работе объекта управления конечный ряд элементарных операций $A_1, A_2, \ldots$, для выполнения которых из управляющего устройства должны быть поданы соответствующие команды (например, «включить толкатель на ход вперёд», «выключить вибростол»). Их называют операторами и обозначают теми же буквами: $A_1, A_2, \ldots$.

Алгоритм также должен определять условия, от которых зависит выполнение того или иного оператора. Такими условиями могут быть:

- выполнение предыдущей операции или нескольких операций;
- наличие или выполнение определённых условий, характеризующих состояние объекта управления (q_i) или каких-либо внешних воздействий (q_i);
- параллельное выполнение нескольких операций и переход к следующей операции только после окончания всех этих операций;

• заданные выдержки времени τ_i, указывающие, что дальнейшие операторы должны выполняться только после заданной выдержки времени.

Взаимодействие объекта управления *ОУ* и управляющего устройства *УУ* можно представить схемой, показанной на рис. 1.9.

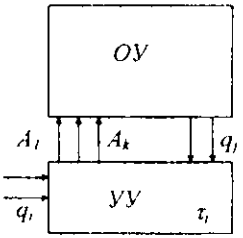


Рис. 1.9

В дальнейшем ограничимся рассмотрением только логических условий, то есть таких условий, которые могут принимать значения $q_i=0$ или $q_i=1$.

Возможны следующие зависимости выполнения оператора от логических условий:

• В зависимости от значения условия (*0* или *1*) происходит переход к одному или другому оператору.

• Переход к следующему (одному!) оператору происходит только тогда, когда данное условие примет определённое значение. Такое условие называется ждущим.

После определения операторов и условий можно описать последовательность работы системы управления в виде логической схемы алгоритма или граф-схемы алгоритма. Логическая схема алгоритма представляет собой запись в виде операторов, логических условий и символов, указывающих последовательность их выполнения.

Более наглядно алгоритм управления представляется граф-схемой алгоритма. Он однозначно соответствует логической схеме и представляет собой ориентированный граф.

Алгоритм работы системы управления довольно просто составляется и читается даже в случае очень сложных систем, в то же время он просто и ясно описывает работу системы и не требует специальных знаний по электротехнике и электроприводу, что обычно необходимо при разработке и изучении принципиальных электросхем или программ. По существу, этот алгоритм является техническим заданием на разработку схемы управления и служит языком общения между разработчиком оборудования или процесса и разработчиком системы управления.

При построении граф-схемы алгоритма выполняются следующие правила:

• каждому оператору A_i сопоставляется вершина с одним выходом;

• логическим условиям сопоставляется вершина с двумя выходами, отмеченными *0* и *1*;

• ждущим условиям и временным задержкам сопоставляется вершина с одним выходом, соответствующим значению условия, равному *1* (или его инверсии).

Последовательность определяется направленными дугами.

Если вслед за оператором A_i всегда независимо от логических условий выполняется оператор A_j, то в логической схеме они записываются один за другим (рис. 1.10,а). На рис. 1.10,б показан случай, когда после выполнения оператора A_i проверяется условие q_k. Если q_k =0, то выполняется оператор A_j, если же q_k = *1*, то выполняется оператор A_l. На рис. 1.10,в после выполнения оператора A_i проверяется условие q_l. Следующий оператор A_j выполняется после того, как условие q_l примет значение *1*.

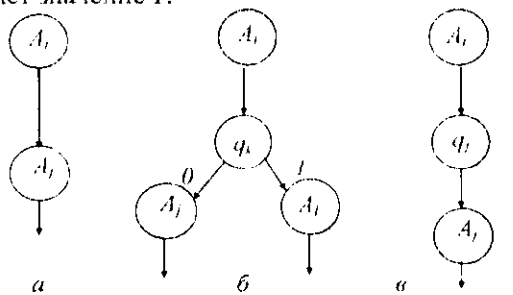


Рис. 1.10

Начало параллельного выполнения операторов изображается разветвлением дуги, а их окончание – вершиной с точкой. На рис. 1.11 после выполнения оператора A_1 одновременно начинают выполняться операторы A_2 и A_3. После выполнения A_2 и A_4 при выполнении условий q_1 и q_2 выполняется оператор A_5.

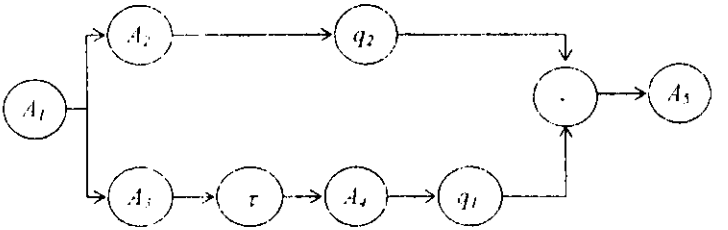


Рис. 1.11

Здесь же показано применение временной задержки. Оператор A_4 начинает выполняться через заданную выдержку времени τ после выполнения оператора A_3.

Составим алгоритм управления выбивной установкой, схема которой показана на рис. 1.5, а циклограмма – на рис. 1.6.

Для разработки алгоритма необходимо определить, какие аппараты выполняют управление механизмами установки, и какие датчики информируют систему управления о состоянии или положении механизмов и окружающей среды.

Вибростол включается на работу и выключается контактором *KK1*; время выбивки отсчитывает реле времени *KT*; толкатель *1* управляется (включается на рабочий и обратный ход) распределителем *P1*, а толкатель *2* – распределителем *P2*. Привод литейного конвейера управляется контактором *KK2*. Все эти аппараты размещены в электро- и пневмошкафах и на схеме установки не показаны.

На рис. 1.5 показано размещение конечных выключателей *GE1* – *GE5*, контролирующих положение отдельных механизмов установки и формы на литейном конвейере. Так, *GE 3* нажат, когда толкатель *1* втянут, а *GE 2* нажат, когда он выдвинут. Конечные выключатели *GE 5* и *GE 4* нажаты соответственно, когда толкатель *2* втянут или выдвинут. Выключатель *GE 1* нажимается очередной формой, подошедшей на литейном конвейере к выбивной установке.

Теперь управление циклограммой работы установки выглядит следующим образом. В момент времени *0* конечный выключатель *GE 1* нажимается подошедшей формой. Тогда, если толкатель *1* находится в исходном положении (*GE 3* нажат), то он должен начать выдвижение, сталкивая форму на вибростол. Если же *GE 3* не нажат, то это значит, что толкатель *1* не находится в исходном положении. Тогда следует остановить литейный конвейер во избежание поломки толкателя *1*. В момент времени *1* толкатель заканчивает движение, нажимая в конце хода на выключатель *GE 2*. По его сигналу должны включиться вибростол и реле времени, задающее время выбивки, а толкатель *1* должен начать движение в исходное положение. В момент времени *2* выдержка времени заканчивается, и по сигналу реле времени следует выключить вибростол и включить толкатель *2*, чтобы он начал движение, сталкивая опоку на транспортёр *5*. В момент времени *3* толкатель *2* заканчивает сталкивание опок, нажимая в конце хода на *GE 4*. По сигналу последнего толкатель *2* следует переключить на обратный ход. Цикл закончится в момент времени *4*, когда будет нажат выключатель *GE 5*.

Для составления граф-схемы алгоритма управления этой выбивной установкой введем операторы:

A, *(i=1,2)* – включение рабочего хода *i*-го толкателя;

B, *(i=1,2)* – включение обратного хода *i*-го толкателя;

C_1 – включение вибростола;

C_2 – выключение вибростола;

D – выключение привода литейного конвейера;

и логические условия.

q_{ij} $(i=1,2;\ j=1,2)$ – i-ый толкатель находится в положении j ($j=1$ – втянут, $j=2$ – выдвинут);

p – очередная форма (на конвейере) находится перед толкателем 1;

τ – заданное время выбивки формы.

Операторы A_i и B_i выполняются соответствующими распределителями, операторы C – контактором включения привода вибростола. Логические условия q_{ij} и p проверяются конечными выключателями, а временная задержка τ задаётся реле времени.

Спецификация операторов и логических условий может иметь следующий вид:

Оператор или условие	Назначение	Аппарат
p	Очередная форма находится перед толкателем *1*	Конечный выкл. *GE 1*
q_{11}	Толкатель *1* втянут (в исходном положении)	Конечный выкл. *GE 3*
q_{12}	Толкатель *1* выдвинут	Конечный выкл. *GE 2*
q_{21}	Толкатель *2* втянут (в исходном положении)	Конечный выкл. *GE 5*
q_{22}	Толкатель *2* выдвинут	Конечный выкл. *GE 4*
τ	Заданное время выбивки истекло	Реле времени *KT*
A_1	Включение рабочего хода *1*-го толкателя	Распределитель *P 1*
B_1	Включение обратного хода *1*-го толкателя	Распределитель *P1*
A_2	Включение рабочего хода *2*-го толкателя	Распределитель *P 2*
B_2	Включение обратного хода *2*-го толкателя	Распределитель *P 2*
C_1	Включение привода вибростола	Контактор *KK 1*
C_2	Выключение привода вибростола	Контактор *KK 1*
D	Выключение привода литейного конвейера	Контактор *KK 2*

Тогда работа системы управления может быть представлена графсхемой алгоритма (рис. 1.12).

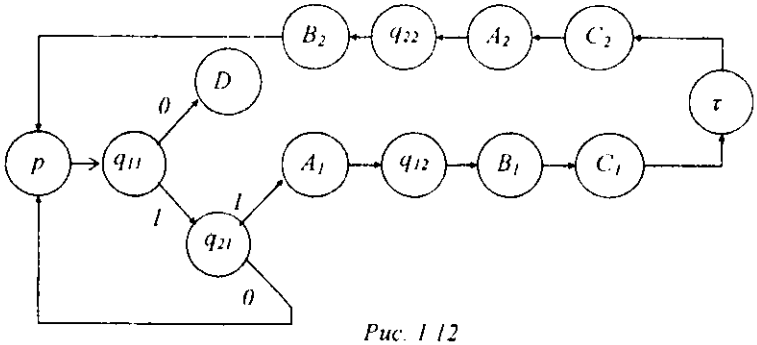


Рис. 1.12

Эта схема описывает работу системы управления следующим образом.

При появлении очередной формы перед толкателем *1* ($p=1$) проверяется, вернулся ли этот толкатель в исходное положение. Если нет ($q_{11}=0$), то даётся команда D на остановку литейного конвейера; дальнейших действий в этом случае алгоритм не определяет. Если $q_{11}=1$, то проверяется, вернулся ли толкатель *2* в исходное положение. Если нет ($q_{21}=0$), то цепочка проверок p, q_{11} и q_{21} повторяется, пока не вернётся в исходное положение толкатель *2* (тогда $q_{21}=1$ и работа установки будет продолжена) или пока форма на конвейере не уйдёт с позиции сталкивания (тогда $p=0$ и установка будет ожидать следующую форму).

При своевременном возврате толкателя *2* ($q_{21}=1$) будет включён рабочий ход толкателя *1* оператором A_1. После выполнения этого хода ($q_{12}=1$) будут включены обратный ход толкателя *1* и вибростол соответственно операторами B_1 и C_1. По истечении выдержки времени τ оператор C_2 выключит вибростол, а оператор A_2 включит рабочий ход толкателя *2*. После выполнения этого хода ($q_{22}=1$) будет включён обратный ход этого толкателя оператором B_2.

§ 5. Автоматическое регулирование

Основные понятия и определения

Работа любой технологической установки характеризуется рядом физических величин, например температурой, давлением, расхо-

дом вещества и т.п. Для обеспечения оптимального режима работы эти величины должны с определенной точностью поддерживаться на заданном уровне или изменяться по определенному закону. Эти задачи решаются системами автоматического регулирования (САР).

Пример САР показан на рис. 1.13. В печи *1* требуется поддерживать постоянную температуру. Печь нагревается газовой горелкой *2*. В зависимости от количества и температуры материалов, загружаемых в печь, условий теплоотвода (при открытых дверцах потери тепла из печи существенно возрастают), количества и качества поступающего в горелку газа и других возмущающих воздействий (обозначим их *z*) температура в печи изменяется, и её необходимо регулировать.

На рис. 1.13 температура в печи *1* регулируется системой автоматического регулирования (САР), состоящей из датчика температуры *3*, регулятора *4*, исполнительного механизма *5* и регулирующих клапанов *6* и *7*, подающих газ и воздух в горелку *2*. В этой САР мощность газовой горелки, а следовательно, и температура в печи регулируется расходом газа и воздуха через регулирующие клапаны. Для нормальной работы горелки в неё должен подаваться газ и воздух в определённой пропорции (избыток воздуха должен составлять 3–7% по отношению к расходу газа, чтобы обеспечить полное сгорание газа). Требуемое соотношение между расходами газа и воздуха, проходящими по соответствующим трубопроводам, регулируется другой САР, здесь не показанной.

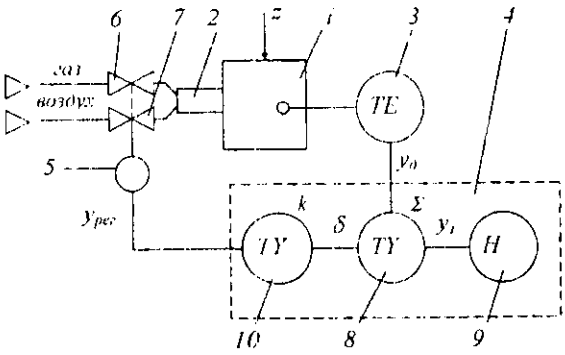


Рис 1.13

Приборы и средства автоматизации обозначены по ГОСТ 21.404–85. Он описан в главе 5.

Между клапанами *6* и *7* в этой САР существует механическая связь (показана пунктиром на рис. 1.13), которая и обеспечивает одновременное изменение расходов в трубопроводах газа и воздуха.[1]

Для пояснения работы регулятора на рис. 1.13 он показан состоящим из отдельных устройств: устройства сравнения *8*, задатчика *9*, усилителя *10*.

В регуляторе действительная температура в печи y_0 сравнивается в устройстве сравнения *8* (см. рис. 1.13) с заданной $y_з$, которая вводится в регулятор задатчиком *9*. Разность между заданной и действительной температурами δ, называемая *ошибкой регулирования* (или *рассогласованием*), поступает в усилитель *10*, усиливается в нём в k раз, и усиленный сигнал (регулирующее воздействие) $y_{рег}$ подаётся на исполнительный механизм (электродвигатель), который перемещает клапан регулирующего органа (регулирующего клапана) так, чтобы уменьшить рассогласование (ошибку регулирования). Здесь при превышении y_0 по сравнению с $y_з$ регулирующий клапан должен уменьшить расход газа и воздуха, чтобы уменьшить y_0.

Описанная САР является простейшей. Регулятор выдаёт управляющее воздействие $y_{рег}$, пропорциональное рассогласованию δ. Такой регулятор и правило, по которому вычисляется $y_{рег}$, называются *пропорциональными*. Часто пропорциональное регулирование не обеспечивает требуемых точности и качества регулирования. Более сложные регуляторы выполняют сложную математическую обработку величины рассогласования, интегрируют и дифференцируют функцию δ от времени, учитывают изменение динамических характеристик объекта регулирования при его работе в разных режимах и при различных возмущающих воздействиях.

Кроме показанных на рис. 1.13 основных устройств, регулятор может включать различные преобразователи, которые выполняют математическую обработку сигнала рассогласования (в современных регуляторах эту обработку выполняют микропроцессорные вычислительные устройства, а прежде она выполнялась различными аналоговыми механическими, электрическими, пневматическими или гидрав-

---

[1] Существуют и другие САР температуры при газовом нагреве. Для отдельных мощных горелок применяются САР, в которых расход газа регулируется по температуре в печи, а расход воздуха – по расходу газа посредством САР соотношения двух расходов (потоков); с другой стороны, для маломощных горелок иногда применяются позиционные САР, в которых расход газа и воздуха, или только воздуха изменяется дискретно, при помощи более дешёвых *запорных* (не *регулирующих*) клапанов. Эти системы описаны в главе 8.

лическими устройствами), преобразуют сигнал одного вида в сигнал другого вида или величины (например, напряжение электрического тока в давление сжатого воздуха (в принятом в этой САР соотношении), аналоговый сигнал – в цифровой и т.д.

В этой САР сигналы передаются электрическими токами различного напряжения. В других САР могут использоваться сигналы других видов: давление сжатого воздуха или жидкости, числовые коды и др., а также различные сочетания этих сигналов.

Описанная САР является примером системы непрерывного регулирования. Применяется также позиционное (релейное) и импульсное (прерывистое) регулирование.

Автоматическим регулированием называется поддержание физических величин на определенном уровне (стабилизирующее регулирование или стабилизация) или изменение их по требуемому закону (программное регулирование) без непосредственного участия человека. В примере производится автоматическое регулирование температуры.

Объектами регулирования называются технические устройства, в которых процессы (точнее, физические величины, влияющие на протекание этих процессов) подлежат регулированию. В примере объектом регулирования является печь.

Регулируемыми величинами называют физические величины, подлежащие регулированию. В примере регулируемой величиной является температура.

Возмущающими воздействиями называют внешние воздействия, вызывающие отклонение регулируемой величины от ее заданного значения (количество и температура материалов, загружаемых в печь, условия теплоотвода).

Автоматическим регулятором называют техническое устройство, предназначенное для регулирования каких-либо величин в объектах. Система автоматического регулирования состоит из двух основных частей – объекта регулирования и автоматического регулятора.

Ошибкой регулирования (рассогласованием) называется разность между заданным и действительным значением регулируемой величины.

Регулирующим воздействием называется воздействие регулятора на объект регулирования.

Алгоритмом или *законом регулирования* называется правило, по которому вычисляется управляющее воздействие регулятора на объект регулирования.

Первичные (измерительные) преобразователи (датчики) – устройства, измеряющие значения регулируемой величины и преобразую-

щие их в эквивалентные значения сигнала другой физической природы, более удобной для последующей передачи и использования (в САР).

Задающие элементы (задатчики) – элементы, с помощью которых в систему регулирования вводится заданное значение регулируемой величины.

Элементы сравнения (суммирующие устройства) – элементы, сравнивающие (или суммирующие) значения двух (или нескольких) сигналов. Выходной сигнал этих элементов равен алгебраической сумме поступающих на их входы сигналов.

Усилители – это устройства, предназначенные для усиления поступающих сигналов.

Регулирующие органы – устройства, непосредственно воздействующие на объект регулирования для поддержания заданного значения регулируемой величины или изменения ее по заданному закону. В САР на рис. 1.13 функции регулирующего органа выполняют регулирующие клапаны.

Исполнительные механизмы – устройства, воздействующие на регулирующий орган и перемещающие его (или изменяющие его состояние) в направлении ликвидации отклонения регулируемой величины от заданного значения. В САР на рис. 1.13 исполнительным механизмом является электродвигатель вместе с кинематической связью между валом электродвигателя и клапанами.

Отдельные элементы САР характеризуются *коэффициентами передачи*, которые представляют отношение выходного сигнала элемента к входному сигналу. Так, для усилителя напряжения коэффициент передачи представляет собой коэффициент усиления этого усилителя – отношение напряжения на выходе усилителя к напряжению на его входе.

Для анализа поведения САР и их элементов во времени, точности и устойчивости САР элементы САР разделяются на звенья, которые описываются дифференциальными уравнениями, представляющими зависимости выходных сигналов звеньев от входных сигналов как функций времени. По виду дифференциального уравнения обычно различают *пропорциональные, инерционные, интегрирующие, дифференцирующие, колебательные* звенья и *звенья запаздывания*. Большинство САР удаётся описать только этими звеньями, хотя существуют и другие, описываемые более сложными уравнениями.

Важнейшими характеристиками, определяющими динамику САР, являются *коэффициенты передачи и постоянные времени* элементов САР.

Переходные процессы в САР

Допустим, что в какой-то период времени САР обеспечивает заданное значение выходной величины $y_0 = y_з$ при некотором значении задающего $y_з$ и возмущающего z воздействий. Такое состояние САР, в котором не происходит изменений задающих и выходных величин и возмущающие воздействия не изменяются, называется установившимся режимом (для колебательных процессов не изменяется характер сигналов). Если в какой-то момент времени τ_0 (рис. 1.14) величина задающего воздействия $y_з$ или возмущающее воздействие z изменяется, то величина y_0 отклоняется от заданного значения. Возникает ошибка регулирования. САР, отрабатывая эту ошибку, изменяет регулирующее воздействие на объект (например, вращает электродвигатель, устанавливая новое положение регулирующих клапанов), через некоторое время устанавливает новое значение регулирующего воздействия, обеспечивающее требуемое значение y_0, и вновь приходит в установившееся состояние.

Процесс перехода САР к новым значениям регулирующего воздействия или возвращения y_0 к заданному значению называется *переходным*.

Если причиной возникновения переходного процесса является изменение задаваемого значения регулируемой величины $y_з$, то после переходного процесса САР установит это новое значение (кривая *1* на рис. 1.14). Если же его причиной явилось изменение величины возмущающего воздействия z, то в ходе переходного процесса будет восстановлено прежнее заданное значение y (кривая *2* на рис. 1.14).

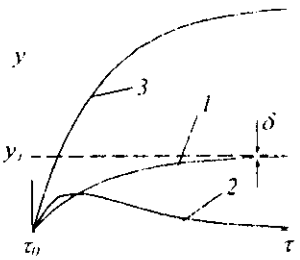


Рис. 1.14

Однако требуемое значение y в новом установившемся состоянии, возможно, будет установлено с некоторой погрешностью (ошибкой регулирования) δ, зависящей как от точности работы отдельных элементов САР, так и от принципиальных свойств САР.

В ходе переходного процесса могут возникнуть недопустимые отклонения значения y_0 или же время переходного процесса может оказаться слишком большим.

При некоторых условиях САР вообще может не выполнить свои функции, и значение y_0 вместо того, чтобы после некоторого отклонения вернуться к заданному значению, начнет все больше отклоняться от него (кривая *3* на рис. 1.14). Такое явление называется *потерей устойчивости* САР.

Переходные процессы в САР могут протекать по разному, в зависимости от динамических свойств и настройки САР.

При введении управляющего воздействия (возмущения по заданию) $y = y_1$ (линия *1* на рис. 1.15,а) устойчивая САР через некоторое время приходит в установившееся состояние, которое характеризуется новым значением выходной величины (возможно, с некоторой ошибкой ε, вызванной статичностью системы или погрешностями в отдельных звеньях САР). Вид переходного процесса зависит от коэффициентов передачи K и постоянных времени T элементов САР. Он может протекать апериодически (кривая *2*) или с затухающими колебаниями (кривая *3*).

При введении возмущающего воздействия (возмущения по на-

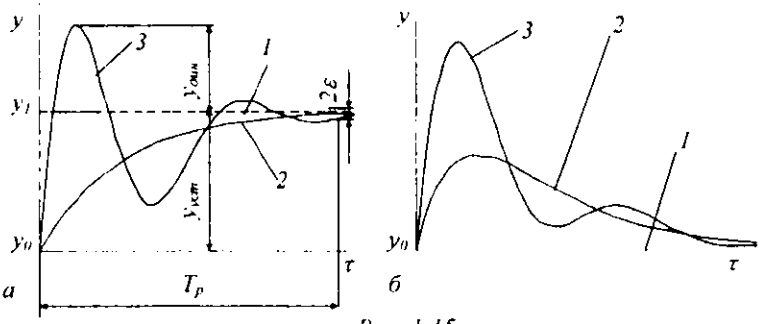


Рис. 1.15

грузке) САР через некоторое время приходит в установившееся состояние, восстанавливая прежнее значение выходной величины $y_0 = 0$ (кривая *1* на рис. 1.15,б). При этом переходный процесс может происходить также апериодически (кривая 2) или с затухающими колебаниями (кривая *3*).

Характер переходного процесса может иметь существенное значение для регулируемого процесса. Поэтому введено понятие качества переходного процесса, которое характеризуется рядом показателей.

Время регулирования T_p – это время, в течение которого (начиная с момента приложения воздействия на систему) отклонение регулируемой величины δ от ее нового установившегося значения $y_{уст}$ станет меньше заданного значения ε (см. рис. 1.15,а). Обычно принимают ε = 5% от установившегося значения. Время регулирования характеризует быстродействие САР. Оно зависит от динамических свойств объекта, закона регулирования и настроек регулятора. Одна-

ко оно не может быть меньше некоторого минимального значения, зависящего в первую очередь от динамических свойств объекта.

Статическая ошибка или *остаточное отклонение* регулируемой величины от заданного значения при окончании переходного процесса.

Максимальное динамическое отклонение регулируемой величины $y_{дин}$, равное первому выбегу регулируемой величины. Оно зависит от динамических свойств объекта, вида возмущения, закона регулирования и настроек регулятора.

Перерегулирование η – это отношение амплитуд двух последующих выбегов регулируемой величины (второго к первому), которое характеризует колебательность переходного процесса при регулировании.

Величина перерегулирования зависит от динамических свойств объекта, закона регулирования и настроек регулятора.

При больших $y_{дин}$ или η могут возникнуть недопустимые отклонения регулируемых параметров, значительные динамические усилия в механических частях системы, перенапряжения в электрических элементах, поэтому перерегулирование ограничивается, например, величиной 20–50%.

Иногда *колебательность* системы характеризуют числом колебаний регулируемой величины за время регулирования $T_р$. Поскольку большое число колебаний вызывает излишний износ механизмов, колебательность ограничивают обычно 1–2 колебаниями.

Интегральные показатели качества регулирования, которые равны определённым интегралам по времени от некоторых функций отклонений регулируемой величины. Обычный интегральный показатель применяется при апериодических переходных процессах. Квадратичный интегральный показатель характеризует отклонения при любом виде переходного процесса.

При *позиционном регулировании* показателями качества являются амплитуда и период автоколебаний регулируемой величины.

Необходимые точность, устойчивость и качество регулирования САР обеспечиваются подбором подходящей структуры регулятора и его настройкой (установкой коэффициентов передачи и постоянных времени), выполняемой при наладке САР.

Для каждого технологического процесса определяются те показатели качества, которые обеспечивают наиболее рациональное его функционирование. Существуют три типа процессов регулирования, один из которых, как правило, удовлетворяет требованиям технологического процесса:

1. Апериодический процесс с минимальным временем регулирования характеризуется сравнительно большим отклонением $y_{дин}$ и минимальным регулирующим воздействием.

2. Процесс с 20-процентным перерегулированием и минимальным временем первого полупериода колебаний. Обеспечивает наименьшее динамическое отклонение $y_{дин}$.

3. Процесс с минимальным квадратичным интегральным показателем, что соответствует 40–45-процентному перерегулированию. Он имеет наименьшее динамическое отклонение $y_{дин}$ при наибольшем перерегулировании и времени регулирования.

Задание для самостоятельной работы

Составьте граф-схему алгоритма управления технологической машиной. К схеме приложите:

- схему машины с указанием её механизмов и размещения конечных выключателей и, если необходимо, других датчиков;
- циклограмму работы машины;
- спецификацию использованных в граф-схеме операторов управления (обозначение операторов и выполняемые ими действие) и логических условий с указаниями, какие аппараты выполняют соответствующие команды управления или проверяют логические условия.

ГЛАВА 2

ДИНАМИЧЕСКИЕ И СТАТИСТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЛИТЕЙНЫХ ПРОЦЕССОВ

§ 1. Динамические свойства регулируемых объектов литейного производства

Объекты регулирования характеризуются такими же динамическими свойствами, что и другие элементы САР. Однако, в отличие от элементов САР, свойства которых подбираются специально для решения той или иной задачи регулирования, свойства объектов регулирования определяются теми технологическими функциями, которые выполняют эти объекты. Не исключено, что объект регулирования может специально конструироваться или модифицироваться таким образом, чтобы облегчить выполнение САР каких-либо задач регулирования. Обычно целью такого конструирования является достижение желательных значений постоянной времени и коэффициента передачи.

Механизмы литейных машин характеризуются обычно как инерционные объекты и при анализе САР рассматриваются как *инерционные* звенья.

Если же постоянная времени T у них незначительна, то они представляются как *пропорциональные* звенья.

Процессы, связанные с инерцией жидкостей и газов при их движении, а также работа пружин и других упругих элементов иногда могут привести к появлению *колебательных* звеньев в системе.

Для технологических объектов литейного производства характерной динамической особенностью является *запаздывание*: возникшее входное воздействие (например, возмущающее воздействие) сказывается на выходной регулируемой величине только по прошествии некоторого времени. Любая транспортная система обладает запаздыванием (называемым транспортным запаздыванием). Простейшим примером запаздывающего звена является ленточный питатель *1* (рис. 2.1), который подает какой-либо материал из загрузочного бункера *2* в приемный бункер регулируемого объекта *3*. Количество подаваемого материала регулируется шибером *4*.

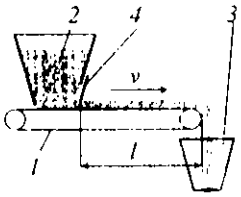


Рис. 2.1

Изменение расхода на входе питателя изменит расход на выходе питателя через время запаздывания $\tau_з = l/v$, где l – длина транспортёра, v – его скорость.

Другим примером может служить вагранка при регулировании температуры выплавляемого ею чугуна изменением величины коксовой калоши. Если в какой-то момент времени величина коксовой калоши будет изменена, то температура чугуна на желобе вагранки изменится только после того, как эта калоша опустится в горн вагранки.

Изменение состава или влажности оборотной смеси, подаваемой в смеситель, скажется на свойствах выпускаемой из него смеси только через некоторое время, необходимое для прохождения этой смеси через смеситель.

В процессах литейного производства регулируемым параметром часто является температура. Тогда для анализа САР важны тепловые свойства объектов регулирования.

Например, производится измерение температуры жидкого металла термопарой погружения, имеющей защитный чехол. Тогда в начальный момент времени ее температура равна температуре среды, окружающей печь с металлом. С течением времени температура всей конструкции (защитного чехла, слоя изоляции и самого горячего спая термопары) повышается и через некоторое время достигает температуры жидкого металла. (Вообще говоря, это верно только при незначительном отводе тепла вдоль термопары.) Если по предъявляемым требованиям разницей температур в разных точках этой системы допустимо пренебречь, то такие объекты рассматриваются как объекты с сосредоточенными параметрами, поведение которых описывается уравнениями в обыкновенных производных.

Уравнение теплового баланса при нагреве такого элемента имеет вид:

$$c \cdot m \cdot dt = \alpha \cdot (t_{cp} - t) \cdot F \cdot d\tau,$$

где t и dt – температура элемента и ее дифференциал; t_{cp} – температура нагревающей среды; m и c – масса элемента и его теплоемкость; α – коэффициент теплоотдачи; F – поверхность теплообмена; $d\tau$ – дифференциал времени. Отсюда получаем уравнение инерционного звена с коэффициентом передачи k (между входным сигналом – температурой среды t_{cp} и выходным – температурой элемента t), равным единице:

$$T \cdot \frac{dt}{d\tau} + t = t_{cp},$$

где $T = \frac{c \cdot m}{\alpha \cdot F}$ – постоянная времени.

Датчики и приборы для измерения температуры обычно характеризуются в справочниках или постоянной времени T (иногда она на-

зывается показателем тепловой инерции), или временем переходного процесса $\tau_{п.п}$ (иногда называемого временем установления показания прибора) при нагреве от температуры окружающей среды до измеряемой температуры. Для приборов, измеряющих температуру, как и для других инерционных звеньев, справедливо соотношение:

$$\tau_{п.п} \approx 3T.$$

В качестве примера объекта, в котором разницей температур в разных его точках пренебречь нельзя, рассмотрим тигельную раздаточную печь сопротивления. Она предназначена для стабилизации температуры жидкого металла и состоит (рис. 2.2,а) из тигля *1* с жидким металлом *2*, нагревателей *3* и корпуса с теплоизоляцией *4*. В качестве динамического звена выделим тигель с металлом. Выходным регулируемым параметром является температура жидкого металла $t_м$, входным - тепловой поток от нагревателя $Q_н$.

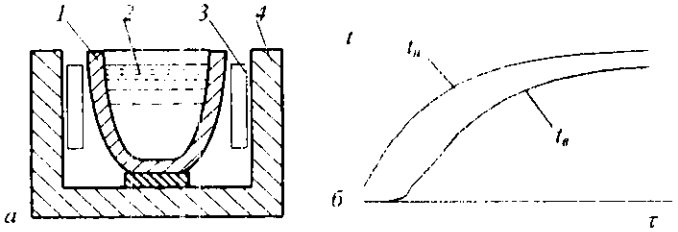


Рис. 2.2

В первом приближении температуру металла по всему объему тигля можно принять одинаковой и равной температуре внутренней поверхности тигля $t_в$, учитывая высокую теплопроводность металла и выравнивающее влияние конвективных потоков в тигле. Температуру же тигля, выполненного из огнеупорного материала с невысокой теплопроводностью, необходимо рассчитывать с учетом этой теплопроводности, используя уравнение теплопроводности Фурье. Если толщина стенки тигля намного меньше его диаметра, то поток тепла от нагревателей к металлу через стенку тигля можно считать одномерным. Задача расчета изменения температуры металла в тигле при мгновенном изменении потока тепла от нагревателей может быть сформулирована следующим образом.

Найти температуру металла в тигле $t_м$ (температуру внутренней стенки тигля $t_в$), если распределение температуры в стенке тигля подчиняется уравнению теплопроводности Фурье:

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = a \frac{\partial^2 t}{\partial x^2},$$

где a – коэффициент температуропроводности материала тигля.

На наружной поверхности тигля $(x=0)$ в момент $\tau=0$ тепловой поток скачком изменяет свое значение на величину $\Delta Q=Q_н-Q_{н0}$, где $Q_{н0}$ и $Q_н$ – соответственно тепловые потоки до и после введения управляющего ступенчатого воздействия.

Поток тепла, поступающий от внутренней стенки тигля $(x=l)$ к металлу, расходуется на увеличение температуры металла $t_м$ и потери с зеркала металла в окружающую среду:

$$-\lambda \frac{\partial t(l,\tau)}{\partial x} \cdot F_T \cdot d\tau = G \cdot c \cdot dt_м + \alpha(t_м) \cdot F_П \cdot d\tau.$$

Начальное распределение температуры в стенке тигля $t_0(x, t)$ находится из уравнений:

$$Q_{н0} = \alpha(t_{м0}) \cdot F_П; \quad t_0(x, \tau) = t_{м0} + Q_{н0}(l-x)/(\lambda \cdot F_T),$$

где λ – коэффициент теплопроводности материала тигля; c, G – теплоемкость и масса металла в тигле; F_T, $F_П$ – поверхности тигля и зеркала жидкого металла; $\lambda(t_м)$ – коэффициент теплоотдачи с поверхности жидкого металла, являющийся функцией температуры металла.

На рис. 2.2,б приведены графики изменения температуры на наружной $t_н$ и внутренней $t_в$ поверхностях тигля, которые могут быть получены при решении сформулированной здесь задачи. Температура на наружой поверхности начинает увеличиваться сразу же после увеличения теплового потока от нагревателя. На внутренней поверхности заметный рост температуры начинается лишь через некоторое время. До этого в основном происходит прогрев стенки тигля. Температура $t_в = t_м$ и является искомой переходной функцией рассматриваемого объекта регулирования. Обратим внимание на то, что если не пренебречь разностью температур в разных точках тигля, задача была бы значительно сложнее, и вместо одной кривой $t_м=f(\tau)$ было бы получено бесконечно большое множество кривых вида $t_м=f(\tau, x, y, z)$, где x, y, z – координаты внутреннего пространства тигля.

В рассмотренном динамическом звене зависимость выходной величины от входной описывается дифференциальным уравнением в частных производных. Такие объекты называются объектами с распределенными параметрами. Их особенность в том, что выходная величина принимает разные значения в разных точках объекта.

В механических системах, как правило, зависимость выходной величины от входной описывалась обыкновенным дифференциаль-

ным уравнением, поэтому выходная величина в разных точках объекта принимала одно и то же значение (например, угол поворота вала электродвигателя, перемещение поршня гидроцилиндра). Такие объекты называются объектами с сосредоточенными параметрами.

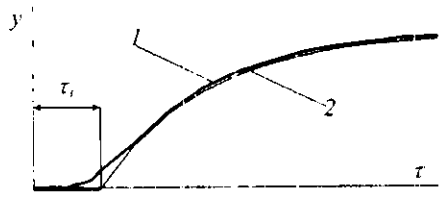


Рис. 2.3

О поведении объекта с распределенными параметрами судят по значению выходного параметра в какой-либо одной, наиболее характерной точке объекта (например, в центре печи). Получают зависимость выходного параметра y в этой точке от времени при ступенчатом входном воздействии. Обычно такая зависимость имеет вид, как показано на рис. 2.3 (кривая *1*). Ее особенностью является запаздывание изменения y по отношению к изменению входного параметра. В нагревательных устройствах это запаздывание связано с прогревом футеровки, теплоизоляции и т.п. Такой объект приближенно описывается в виде двух последовательно соединенных динамических звеньев: звена чистого запаздывания со временем запаздывания τ, и инерционного звена (кривая *2* на рис. 2.3).

Объекты с распределёнными параметрами весьма характерны для литейного производства. К ним относятся, например, различные технологические объекты, подвергающиеся нагреву в ходе выполнения технологического процесса (металлические формы, нагреваемые стержневые ящики). Иногда для получения качественной отливки при литье в металлические формы требуется получить определенное распределение температуры на рабочей поверхности формы с тем, чтобы обеспечить направленное затвердевание отливки. В других случаях, при использовании многогнёздной оснастки, большая разница температур в разных гнёздах нежелательна, так как, во-первых, их размеры становятся разными, во-вторых, различны и условия формирования отливки в этих гнёздах. Например, разница температур в разных гнёздах оснастки из стали в 50 К на длине 200 мм при коэффициенте линейного расширения $13 \cdot 10^{-6}$ 1/К даст разницу размеров полостей 0,13 мм.

§ 2. Статистические характеристики литейных процессов

Функции распределения параметров литейных процессов

Особенностью большинства параметров литейных процессов, связанных со свойствами материалов, используемых в процессе (материалов форм и стержней, литейных сплавов), является их чётко выраженная статистическая (вероятностная) природа. Это объясняется тем, что из нескольких сот факторов, влияющих на значение того или иного параметра, может быть зафиксировано несколько десятков, а остальные создают «шумовой фон» и «размазывают» значение параметра.

Для использования статистических величин в управлении необходимо знать их статистические характеристики, в первую очередь вид функции распределения. Считается, что такие литейные параметры обычно имеют нормальное (по закону Гаусса) распределение. Последнее имеет место именно в тех случаях, когда случайная величина представляет собой сумму очень большого числа взаимно независимых случайных величин, влияние каждой из которых на всю сумму ничтожно мало.

При экспериментальном определении функций распределения для количественной оценки их отличия от нормального служат специальные характеристики случайной величины, в частности *асимметрия* и мера крутости – *эксцесс* (или константы Пирсона). Они вычисляются по следующей схеме:

$$b_1 = m_3^2/m_2^3 = S_k^2; \quad b_2 = m_4/m_2^2 = E_k + 3,$$

где b_1, b_2 – константы Пирсона;

S_k – асимметрия;

E_k – мера крутости (эксцесс);

$x_{cp} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} x_i$ – среднее значение;

$$m_k = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(x_i - x_{cp})^k$$ – момент k-го порядка.

Для нормального распределения $b_1 = 0$; $b_2 = 3$ ($S_k = 0$ и $E_k = 0$). Поэтому, если для изучаемого распределения S_k и E_k имеют небольшие значения, то можно предположить близость этого распределения к нормальному. Наоборот, большие значения этих характеристик указывают на значительное отклонение распределения от нормального.

Был исследован ряд параметров литейных процессов (содержание элементов в чугуне, свойства смесей), определялись константы Пирсона. Результаты показывают, что значительная часть исследованных па-

раметров имеет функции распределения, близкие к нормальному закону, однако заметен разброс величин: b_1 – от 0 до 0,3, b_2 – от 2 до 4.

Было установлено также, что увеличение объёма выборки от100 до нескольких тысяч не влияет на эти характеристики, причём на разных производствах одни и те же технологические параметры имеют различные статистические характеристики.

Одной из причин отклонений распределений от нормального является влияние регулирующих воздействий и стандартов, которые «отсекают» естественные ветви нормального распределения. Другая причина – преобладающее влияние одного из факторов.

Статистический контроль и управление

При статистическом контроле и управлении процессом, результат которого определяется только одним параметром, в предварительном исследовании на представительном статистическом материале определяется вид функции распределения этого параметра, задаются допустимые вероятности выхода контролируемого параметра за границы регулирования и на этой основе определяются границы регулирования. Затем в ходе работы периодически производятся небольшие выборки (5–7 элементов), для которых определяются значения регулируемого параметра, выборочные арифметические средние и дисперсии. Они сопоставляются с предварительно установленными верхним и нижним допустимыми значениями. При этом производится проверка статистической гипотезы о несущественном изменении контролируемого параметра. Если эта гипотеза отвергается, значит, появился какой-то новый фактор, вызвавший изменение контролируемого параметра; необходимо управляющее воздействие для компенсации влияния этого фактора.

Рассмотрим простейший пример управления прочностью формовочной смеси, получаемой в смесителе, при распределении значений этой прочности, близком к нормальному. Границей регулирования задано минимальное значение средней прочности смеси, которое не должно быть меньше 0,150 МПа с вероятностью 0,95.

При очередном измерении, при пяти замерах (n = 5) было получено: x_i = {0,147; 0,155; 0,155; 0,165; 0,165} МПа, i = 1, 2,…5, откуда выборочное среднее $x_{ср}$ и «исправленное» стандартное отклонение (эмпирический стандарт) s равны:

$$x_{cp} = \frac{1}{n}\sum_{n} x_i = 0{,}1574 \text{ МПа},$$

$$s = \sqrt{\frac{1}{n-1}\sum_{i=1}^{n}(x_i - x_{cp})^2} = 0{,}007668 \text{ МПа}$$

При небольших выборках ($n<30$) для оценки вероятности отклонения выборочного среднего x_{cp} от среднего генеральной совокупности x_0 используется распределение Стьюдента. Учитывая симметрию распределения Стьюдента, из чего $t_P = |t|_{2P-1}$, (где t_P – квантиль распределения Стьюдента для заданной вероятности P), по соответствующей таблице или формулам находим квантиль распределения Стьюдента для заданной вероятности 0,9 (так как $t_{0,95} = |t|_{0,9}$) и числе степеней свободы $k = n - 1 = 4$, которая оказывается равна 2,13. Затем из соотношения Стьюдента

$$T = \frac{x_{cp} - x_0}{s/\sqrt{n}},$$

где x_0 – генеральное среднее, то есть среднее значение прочности смеси, получаемой в смесителе, находим:

$$|x_{cp} - x_0| = |t|_{0,9} \cdot s/\sqrt{n} = 0{,}0073 \text{ МПа}.$$

Из этого следует, что с вероятностью 0,9 средняя прочность находится в интервале $x_{cp} \pm 0{,}0073$ МПа, то есть в интервале от 0,1501 до 0,1647 МПа, или с вероятностью 0,95 имеем: $x_0 > 0{,}1501$ МПа.

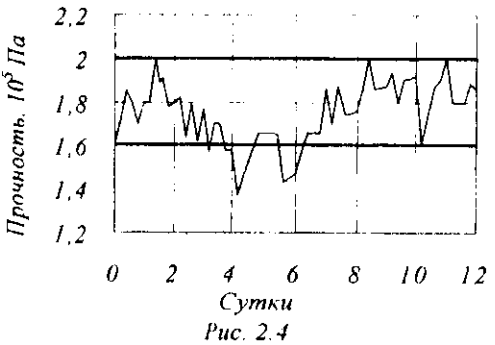


Рис. 2.4

Таким образом, контролируемая величина не вышла за границы регулирования, и управляющее воздействие не требуется. В против-

ном случае потребовались бы воздействия для повышения прочности смеси, например увеличение добавки бентонита.

На рис. 2.4 показана контрольная карта статистического регулирования прочности смеси в системе приготовления смеси для автомата горизонтально-стопочной формовки. График построен по средним значениям прочности в контрольных выборках. Границами регулирования являются значения $1{,}6 \cdot 10^5$ Па и $2 \cdot 10^5$ Па. При выходе контролируемого параметра из допустимого диапазона производятся регулирующие воздействия на смесь.

В ряде случаев при управлении контролируется несколько параметров распределения, определяется их изменение во времени; для управления по нескольким переменным создаётся математическая модель процесса.

§ 3. Оценка устойчивости и качества регулирования технологического процесса

Анализ информационных потоков в процессе

На рис. 2.5 представлена часть технологического процесса производства отливок. Показан один из основных компонентов технологического процесса изготовления отливки, связанный с получением и использованием формовочной смеси. Другие компоненты – получение жидкого металла, стержней и вспомогательные процессы – для упрощения схемы опущены.

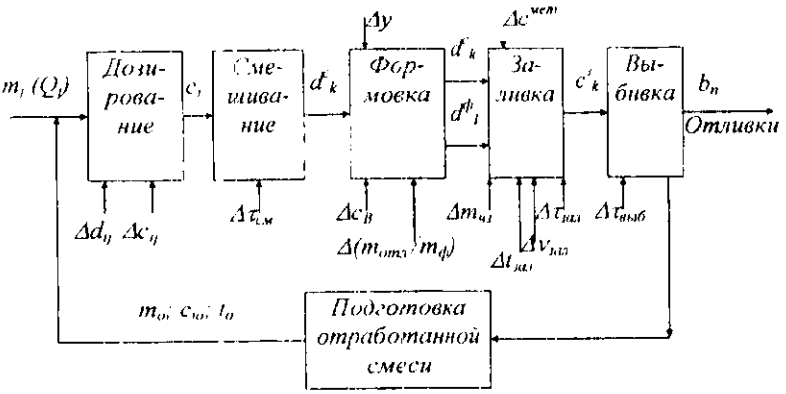


Рис. 2.5

На схеме показаны основные входные и выходные параметры, характеризующие отдельные операции процесса и имеющиеся основные возмущающие воздействия.

На схеме обозначено:

- m_j, (Q_j), $j=1,...J$ – масса (расход) j-го компонента смеси, подаваемого в смеситель (оборотной смеси, песка, связующего, воды, различных добавок);
- c_i, $i=1,...I$ – компонентный состав смеси после её приготовления (содержание песчаной основы, активной глины, влаги, углеродосодержащих материалов, мелких фракций, зерновой состав);
- d^c_k, $k = 1,...K$ – набор свойств смеси после её приготовления (прочность на сжатие и срез, газопроницаемость, уплотняемость, текучесть, формуемость, и др.) или другой набор свойств, в зависимости от точки зрения специалиста на то, какие именно свойства или методы их определения наиболее полно характеризуют качество смеси как материала для получения форм и отливок в конкретном производстве и какие методики и технические средства определения этих свойств имеются в его распоряжении;
- $d^ф_l$, $l=1,...L$ – набор свойств формы (плотность и твёрдость формы, неравномерность их распределения в форме, отсутствие обвалов и засоров);
- c^1_i, $i=,...I$ – состав смеси, изменённый в результате заливки;
- b_n, $n=1,...N$ – показатели качества (отсутствия дефектов, вызванных смесью и формой) отливки (ужимин, пригара, засоров, обвалов, песочных и газовых раковин, раздутий, недоливов, спаев, трещин, отклонений геометрии);
- $m_{об}$ и $c_{ю}$ – соответственно расход и состав оборотной смеси после её переработки.

Основные возмущающие воздействия в этом процессе:

- Δc_{ij} – колебания содержания i-ых компонентов в j-ых составляющих смеси (в основном – в оборотной смеси);
- Δd_{ij} – колебания свойств исходных компонентов (i-свойства в компоненте j);
- $\Delta \tau_{см}$ – колебания времени смешивания;
- Δc_{ii} – изменение влажности смеси из-за высыхания в транспортной системе;
- Δy – колебание уплотнения форм на формовке;
- $\Delta(m_{от}/m_ф)$ – изменения соотношения масс отливки и формы при смене модельной оснастки;
- $\Delta m_{пз}$ – колебания потока незалитых форм;

- $\Delta t_{зал}$ – колебания температуры заливки;
- $\Delta v_{зал}$ – колебания скорости заливки;
- $\Delta \tau_{зал}$ – колебания времени заливки;
- $\Delta \tau_{выб}$ – колебания времени охлаждения отливок в форме до выбивки;
- $\Delta c^{мет}$ – колебания состава заливаемого металла.

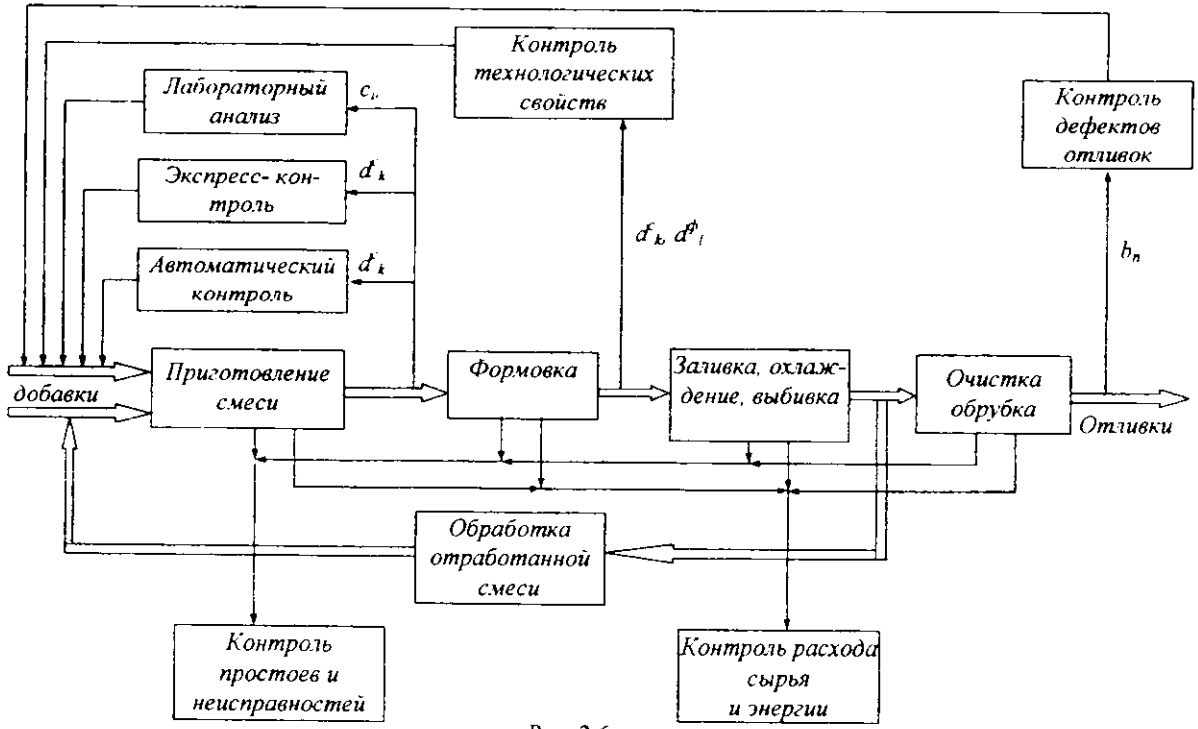

Контроль технологических свойств
Лабораторный анализ
c_i
Экспресс- контроль
d'_k
Автоматический контроль
d'_k
d'_k, d''_l
Контроль дефектов отливок
b_n
добавки
Приготовление смеси
Формовка
Заливка, охлаждение, выбивка
Очистка обрубка
Отливки
Обработка отработанной смеси
Контроль простоев и неисправностей
Контроль расхода сырья и энергии

Рис. 2.6

В настоящее время для управления литейным процессом обычно используется схема получения информации о процессе, представленная на рис. 2.6.

В схеме показано:

1 – автоматический контроль свойств смеси. Эти данные получаются на выходе операции приготовления смеси и используются для регулирования её состава и свойств;

2 – экспресс-контроль свойств смеси. Частота контроля – 2–3 раза в час, результаты получаются примерно через 0,5 часа после выпуска смеси;

3 – лабораторный анализ состава и свойств смеси (зерновой состав, прокаливание, содержание активного связующего и др.). Время выполнения анализов – до 24 ч, выполняется анализ раз в две недели;

4 – контроль свойств смеси на формовке, выполняемый формовщиком по результатам формовки. Время получения и передачи этой информации на участок приготовления смеси – 0,5–1 ч (оно складывается из времени транспортировки смеси на участок формовки и получения нескольких форм, на которых будут выяснены особенности этой смеси);

5 – контроль качества отливок, по которому уже окончательно судят о качестве смеси. Качество определяется при разборе и анализе брака отливок (на «площадке брака») за истекшие сутки. Такой разбор брака обычно производится раз в сутки. Время получения и передачи этой информации на участок приготовления смеси – 24 ч после выпуска смеси.

Особенностью этой схемы являются чрезмерно большие запаздывания в получении информации о процессе и вызванная этим невозможность её оперативного использования для целей управления.

Динамические характеристики литейного технологического процесса

На основе анализа вышеописанной схемы технологический процесс получения отливки можно представить как динамическую систему, подлежащую регулированию, учитывая следующее.

К динамическим характеристикам управляемого объекта относятся те свойства (характеристики) объекта, которые влияют на связь управляемого параметра и управляющего воздействия. В зависимости от конкретного параметра это могут быть механические, тепловые, информационные, организационные и другие воздействия. Например, это могут быть ускорения или силы, зависящие от массы объекта, или изменения его температуры, или запаздывание информации, получаемой от датчиков и приборов, или прохождение по служебным инстан-

циям распоряжений и инструкций, или замены негодного материала, используемого в производстве.

Литейные процессы отличаются многооперационностью, разнооперационностью, многообразием влияющих на них факторов. Для них характерно большое количество возмущающих воздействий (некоторые авторы насчитывают до 600 таких воздействий), из которых можно тем или иным способом контролировать несколько десятков. Многие возмущающие воздействия и в настоящее время остаются неконтролируемыми, по крайней мере с точки зрения использования соответствующей информации в режиме реального времени для работы системы автоматического управления.

Поэтому о результатах литейного процесса окончательно судят по качеству полученных отливок, а время между выполнением какой-либо операции и оценкой её результатов по качеству отливки существенно определяет динамику литейного процесса как объекта управления.

Динамические особенности технологического литейного процесса могут быть сформулированы следующим образом.

В технологическом процессе и в системе управления процессом имеются звенья запаздывания по времени. В линии прямой связи (то есть непосредственно в технологическом процессе) эти запаздывания определяются временем выполнения самого технологического процесса. В линии обратной связи это время запаздывания информации о качестве отливок. Оно связано с частотой контроля качества отливок и временем обработки полученной информации.

Некоторые элементы технологического процесса могут рассматриваться как безынерционные звенья. Например, воздействия в виде изменения пропорций при дозировке компонентов формовочной смеси или шихтовке сплава, переналадка режима уплотнения на формовочных машинах и ряд других ступенчатых воздействий приведут также к ступенчатому изменению соответствующих выходных величин по истечении времени запаздывания.

Инерционностью таких процессов, как выплавка металла или термообработка отливок, в рассматриваемой задаче можно пренебречь, поскольку постоянные времени этих процессов значительно меньше, чем время запаздывания всего технологического процесса, и рассматривать эти элементы процесса как безынерционные.

Некоторые части технологического процесса получения отливки представляют собой непрерывные звенья, в других частях происходит дискретизация проходящих сигналов. Так, свойства формовочной смеси, выпускаемой из смесителя непрерывного действия, есть величины непрерывные, а свойства смеси в литейных формах – величины

дискретные: свойства металла, выплавляемого в вагранке – величины непрерывные, а свойства металла в ковше, подаваемом на заливку, – величины дискретные.

Рассмотрим структурную схему некоторой системы автоматического управления (рис. 2.7). Система преобразует вектор входных воздействий $F = \{f_1, \ldots f_m\}$ в вектор выходных величин $Y = \{y_1, \ldots y_n\}$. Регулятор по отклонениям Y формирует вектор регулирующих воздействий $X = \{x_1, \ldots x_m\}$. Объект управления состоит из ряда параллельных ветвей, формирующих тот или иной компонент вектора Y. В каждой из них имеются непрерывные части, импульсные звенья, $И.з._i$ – звенья запаздывания в технологических цепочках $e^{-p\tau_{xi}}$ и информационное запаздывание в цепи обратной связи $e^{-p\tau_E}$.

Таким образом, система на рис. 2.7 отражает основные динами-

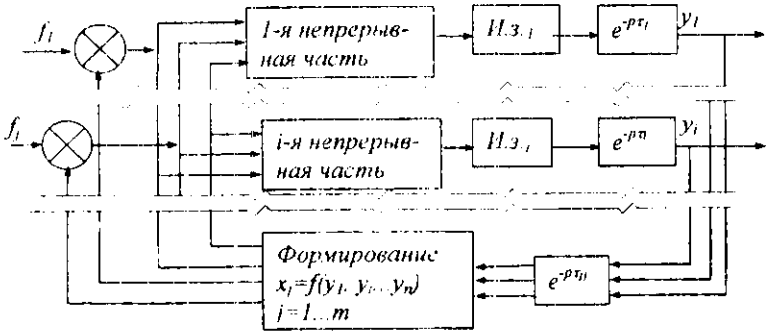


Рис. 2.7

ческие особенности такого специфического объекта управления, как технологический процесс литейного производства. Схема показывает прохождение основных возмущающих воздействий через объект управления.

От реальной схемы системы управления процессом система на рис. 2.7 отличается следующим:

- она не учитывает того, что в каждой цепи формирования того или иного выходного параметра может быть различное число непрерывных, импульсных звеньев и звеньев запаздывания и различно их взаимное расположение;
- локальные контуры регулирования (например, регулирование влажности и свойств смеси, регулирование температуры и давления в некоторых устройствах), а также внутренние перекрёстные связи для большей чёткости общей картины опущены;

• в существующих системах часть линий связи реализуется не техническими средствами, а операторами и технологами, управляющими процессом.

Тем не менее, схема отражает основные динамические особенности технологического процесса и управления им по тем выходным параметрам, которые определяются только на последнем этапе процесса – при контроле готовой продукции.

Анализ устойчивости системы

Для выяснения устойчивости системы управления процессом, показанной на рис. 2.7, рассмотрим более простую систему. На рис. 2.8 представлена структурная схема автоматической системы регулирования по каналу возмущающего воздействия. Здесь W_p выражает передаточную функцию регулятора, влияние которой на устойчивость и предстоит выяснить, k – передаточную функцию линии прямой связи (технологического процесса) и $e^{-p\tau_t}$ – её запаздывание.

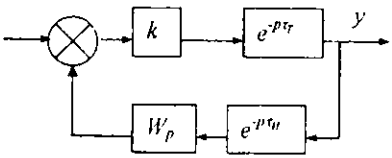


Рис. 2.8

От исходной эта система отличается следующим:

• система является одноконтурной;

• поскольку инерционностью элементов непрерывной части в такой постановке вопроса можно пренебречь, они представлены безынерционным звеном с передаточной функцией k;

• опущены импульсные элементы. Практически это не влияет на результат, так как в цепи прямой вязи (в самом процессе) периоды дискретизации (время изготовления одной формы, время расходования одного ковша, поданного на заливку и т. п.) малы по сравнению с общим запаздыванием в системе. Такая система может рассматриваться как непрерывная, а в цепи обратной связи теоретически можно представить непрерывный контроль продукции.

Указанные упрощения позволяют более наглядно выяснить динамические особенности системы. Проведём *приблизительную оценку* устойчивости системы. Поскольку воздействия на систему носят вероятностный характер, в дальнейшем анализе будем иметь в виду *средние значения*. Устойчивость системы будем выяснять при поступлении в неё гармонических возмущающих воздействий.

Смысл оценки следующий. Ряд исходных материалов поступает в производство партиями. Их свойства могут от партии к партии не-

сколько изменяться. Изменения в составе оборотной смеси зависят от характеристик изготавливаемых отливок. Номенклатура отливок время от времени меняется. Атмосферные условия могут изменять влажность некоторых компонентов стержневых смесей и металлической шихты. Все эти факторы приводят к колебаниям возмущающих воздействий, влияющих на литейный процесс.

Выясним устойчивость системы при использовании пропорционального регулятора с коэффициентом передачи $k_p = 1/k$. Именно такого регулирующего воздействия следует ожидать при ручном регулировании, когда оператор вводит управляющее воздействие, компенсирующее обнаруженное отклонение y, в текущий момент времени.

Надо отметить, что система на рис. 2.8 при выбранном типе регулятора является устойчивой в принципе. Однако её исследование даёт полезную информацию.

Передаточная функция системы по каналу возмущающего воздействия имеет вид:

$$\Phi_f(s) = \frac{W_{ob}(s)}{1 + W_p(s) \cdot W_{ob}(s)} = \frac{k \cdot e^{-p\tau_T}}{1 + e^{-p(\tau_T + \tau_H)}},$$

где W_{ob} – передаточная функция объекта управления.

Для анализа этой функции найдём корни её характеристического уравнения. Заменим комплексную переменную p на мнимую переменную iw, где w – угловая скорость гармонического колебания, i – мнимая единица, и приравняем знаменатель передаточной функции нулю. Получим:

$$1 + e^{-p(\tau_T + \tau_H)} = 1 + e^{-iw\tau_3} = 1 + \cos w\tau_3 - i \sin w\tau_3 = 0.$$

Здесь введено время общего запаздывания $\tau_3 = \tau_T + \tau_H$.

Это уравнение имеет бесчисленное множество корней при

$w\tau_3 = \pi, 3\pi, 5\pi, \ldots \pi(2n-1), \ldots$

При этих значениях ($w\tau_3$) система оказывается на пороге устойчивости.

Переходя от угловой скорости w к периоду колебаний T по соотношению $w = 2\pi/T$, для порога устойчивости (первого корня уравнения) получим:

$\tau_3 = T/2$.

Очевидно, в таком режиме система будет работать с максимальной погрешностью регулирования.

Рассмотрим работу системы при гармонических колебаниях возмущающего воздействия f (рис. 2.9). На графике кривая 1 представляет это воздействие. Если запаздывания нет ($\tau_3 = 0$), то, с учётом

принятого выше коэффициента передачи $k_р = 1/k$, регулирующее воздействие, подаваемое на вход объекта, равно возмущающему, но с обратным знаком (кривая 2). При этом ошибка регулирования оказывается равной нулю, и на выходе объекта будет поддерживаться заданное значение регулируемой величины. Погрешность регулирования равна нулю.

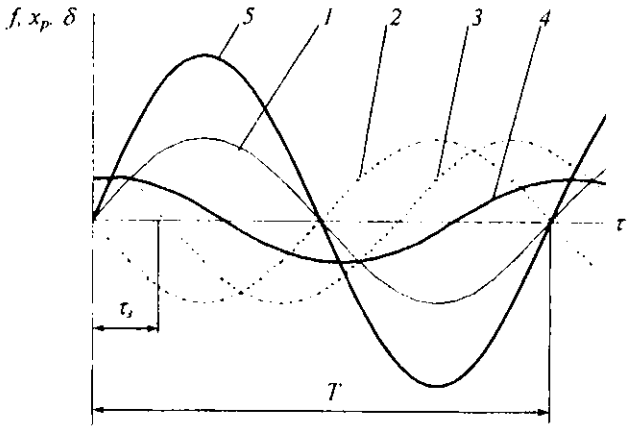


Рис. 2.9

Небольшое запаздывание $\tau_з$ приводит к тому, что величина регулирующего воздействия (кривая 3) запаздывает по сравнению с величиной возмущающего воздействия. В результате на вход объекта подаётся возмущение, равное разности кривых 1 и 3 (кривая 4), и на выходе возникнет соответствующее отклонение регулируемой величины от заданного значения.

Максимальное отклонение регулируемой величины возникнет при работе на пороге устойчивости: $\tau_з = T/2$. В этом режиме регулирующее воздействие, опаздывая от возмущения на половину периода, не уменьшает, а увеличивает его. В результате совместное действие возмущающего и регулирующего воздействий увеличивает ошибку регулирования на входе объекта (для принятой на рис. 2.8 схемы в два раза) по сравнению с объектом, в котором вообще не производится регулирование.

Для нормального и эффективного функционирования системы регулирования должно соблюдаться условие:

$$\tau_з << T/2.$$

При значениях $\tau_з$, близких к $T/2$, качество регулирования будет чрезвычайно низким, так как на протяжении большей части периода колебания возмущающего воздействия объект будет получать регулирующие воздействия, противоположные тем, которые действительно нужны для ликвидации возмущения.

Таким образом, в системе со значительными (и случайными!) запаздываниями и высокой частотой возмущающих воздействий невозможно качественно управлять процессом, если возмущения нельзя измерять на входе в систему.

Выбор максимально допустимого отношения $\tau_з/T$ определяется конкретным технологическим параметром, его допустимыми отклонениями.

В зависимости от принятого максимального значения $\tau_з/T$ возмущающие воздействия можно разделить на два типа: с малыми и с большими относительными запаздываниями. Возмущения с малыми запаздываниями могут быть отрегулированы системой управления. При больших запаздываниях можно использовать методы регулирования по возмущениям, а также применять различные технологические, конструкторские и организационные средства: усреднение, стабилизацию, понижение частоты появления возмущений, статистические методы управления.

Оценка качества управления по интегральному критерию

Рассмотрим качество регулирования процесса, в котором периодически появляются возмущения, вызывающие брак отливок, длительность которых (возмущений) $\tau_в$, а время запаздывания $\tau_з$. Предположим, что есть возможность скомпенсировать это возмущение соответствующим управляющим воздействием, которое в невозмущённом процессе также вызовет брак. Тогда (рис. 2.10, где τ – время, $x=1$ – возмущение, $x = -1$ – корректирующее воздействие) с момента $\tau=0$ в течение времени $\tau_з$ будет получен брак, затем в течение $\tau_1 = \tau_в - \tau_з$ будет получена качественная продукция, а затем в течение $\tau_2 = \tau_з$ – снова брак в силу действия корректировки невозмущённого процесса.

Оценим качество регулирования процесса критерием K, представляющим собой отношение времени получения брака при регулировании ко времени получения брака без регулирования $K = \dfrac{\tau_{б.р}}{\tau_{б.н}}$. Получим: $K = \dfrac{\tau_{б.р}}{\tau_{б.н}} = \dfrac{2\tau_з}{\tau_в}$.

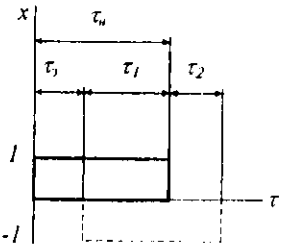


Рис. 2.10

По существу, получено то же значение, что и при анализе гармонического процесса. При $K < 1$ регулирование эффективно; оно тем полезнее, чем K меньше 1. При $K > 1$ регулирование увеличивает время получения бракованной продукции.

Может показаться, что анализ статистических параметров процесса со временем может оказаться излишним, если, следуя идеям стандартов серии ISO 9000, тщательно контролировать процессы. Тогда его результаты окажутся приемлемыми и для производителя, и для потребителя. Последнее действительно так, но с некоторым добавлением.

Надо иметь в виду, что действующая технология обеспечивает определённые характеристики продукции (вес, несущую нагрузку, стоимость). На эти характеристики и ориентируются конструкторы изделий. Надо вспомнить, что в начале XX века прочность чугуна была на уровне *4–5* кг/мм^2, а в конце – 20–40 и даже *60* кг/мм^2. Конечно, это произошло в основном за счёт усовершенствования технологии, разработки новых методов плавки и обработки жидкого металла. Но и ужесточение параметров процесса, сужение диапазона их колебаний также внесли свою долю.

По мере улучшения технологических процессов диапазон разброса параметров сужается и смещается в сторону максимально достижимых значений. Это приводит к тому, что конструкторы литых деталей будут применять более высокие достижимые значения характеристик проектируемых деталей (более высокие допускаемые напряжения, более тонкие стенки отливок) для одной и той же технологии. Такая деталь будет более конкурентноспособна.

Стремление сжать диапазон статистического разброса технологических параметров (и связанное с ним повышение допустимых значений характеристик литых деталей), по-видимому, никогда не закон-

чится. Для повышения эффективности этого процесса надо изучать статистические характеристики процессов и материалов.

Улучшение управляемости технологического процесса

В связи с показанными особенностями технологического процесса литья для повышения его эффективности и расширения областей применения автоматического управления принимаются следующие меры:

- проводится анализ возмущающих воздействий. Выявляются воздействия с относительно малыми и большими запаздываниями;
- воздействия с относительно малыми запаздываниями регулируются, средствами автоматического управления или при больших T организационными методами (например, переналадкой оборудования);
- влияние воздействий с относительно большими запаздываниями устраняется или уменьшается следующими способами:

– стабилизацией возмущающих воздействий;

– понижением их частоты за счёт применения различных способов усреднения (в самом технологическом процессе);

– использованием методов регулирования по возмущениям;

– введением статистического контроля и управлением по его результатам;

– создаются датчики для контроля различных этапов процесса и углубляется на этой основе пооперационный или еще более детальный контроль и управление (увеличивается количество контролируемых параметров, контролируются промежуточные этапы процесса), что может существенно снизить время запаздывания в соответствующих звеньях процесса и повысить эффективность управления.

В последующих разделах будут рассмотрены пути решения задач управления, достигнутые при реализации указанных выше мер. В большинстве случаев это связано с использованием вычислительной техники.

Контрольные вопросы

1. Назовите объекты литейного производства, характеризуемые в системах регулирования как объекты с запаздыванием.

2. Назовите объекты литейного производства, характеризуемые в системах регулирования как объекты с распределёнными параметрами.

3. Какие свойства литейных материалов могут быть охарактеризованы как вероятностные и почему?

4. Для чего необходимо знать функции распределения технологического параметра?

5. Достаточно ли для получения качественной продукции обеспечить устойчивость процесса?

6. Как можно улучшить управляемость технологического процесса?

ГЛАВА 3

ИНФОРМАЦИОННЫЕ СРЕДСТВА СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ

§1. Датчики, приборы и измерительные системы

Основные термины, понятия и определения

Система управления получает информацию о состоянии объекта управления и внешних условиях от датчиков, приборов, измерительных систем, а также других систем управления.

Датчиком (чувствительным элементом, первичным преобразователем) называется элемент, преобразующий контролируемую величину в величину другого вида, более удобную для использования в системе управления. Контролируемая величина является для датчика входным сигналом, а вырабатываемая датчиком – выходным.

Непосредственно использовать выходной сигнал датчика для целей управления удаётся далеко не всегда. Часто требуется измерить значение контролируемой величины в каких-либо стандартных единицах, а также решить некоторые сопутствующие задачи (например, вывести на пульт управления оператора, устранить влияние окружающей среды, размножить сигнал для его передачи в различные устройства). В таких случаях сигнал датчика поступает (возможно, через ряд промежуточных преобразователей) в *измерительный прибор*, а из прибора - в систему управления.

В наиболее сложных случаях, например, если контролируемая среда перед измерением должна быть специально подготовлена (например, газ для газоанализатора должен быть охлаждён и очищен от примесей) или если об измеряемой величине судят по некоторому косвенному показателю (например, измерение уровня металла в дозаторе может измеряться по «давлению пробулькивания» газа, вводимого в жидкий металл в строго определённом количестве), для соответствующих измерений используются целые *измерительные системы*, состоящие из ряда приборов и аппаратов.

По виду *входного* сигнала различаются датчики перемещения, силы, давления, уровня, расхода, скорости, ускорения, линейных размеров, температуры, состава вещества и т.д.

По характеру *выходного сигнала* датчики делятся на:

– датчики с непрерывным (аналоговым) выходным сигналом;

– датчики с дискретным выходным сигналом;

– датчики с релейным выходным сигналом;

– датчики с цифровым выходным сигналом.

У датчиков с *непрерывным* выходным сигналом непрерывному изменению входного сигнала соответствует непрерывное изменение выходного сигнала.

На рис. 3.1 кривые *1* и *2* показывают статические характеристики (линейную и нелинейную) датчиков с непрерывным выходным сигналом (x и y – соответственно входной и выходной сигналы датчика). Примерами таких датчиков являются термопары.

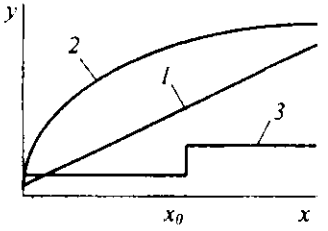


Рис. 3.1

У датчиков с *дискретным* выходом непрерывному изменению входного сигнала соответствует дискретное изменение выходного сигнала. Частными случаями таких датчиков являются датчики с *релейным* выходом (у последних на выходе возможны только два значения: да и нет или 0 и 1) и датчики с *цифровым* выходом. Характеристика релейного датчика представлена кривой *3* на рис. 3.1. Например, при $x<x_0$ $y = 0$, при $x \geq x_0$ $y = 1$. Примером такого датчика является конечный выключатель. Часто датчики с релейным выходным сигналом называют реле (реле давления, реле скорости и т.п.).

Очень часто в датчике измеряемая величина вначале преобразуется в перемещение чувствительного элемента, а перемещение – в какой-либо выходной сигнал.

По виду выходного сигнала датчики разделяются на электрические (если выходной сигнал является какой-либо электрической величиной), пневматические и гидравлические датчики. У последних выходным сигналом обычно является давление. У электрических датчиков выходным сигналом может быть величина активного сопротивления, емкости, индуктивности, напряжения постоянного тока, амплитуды напряжения переменного тока, частоты электрических импульсов и др.

Метрологические характеристики датчиков определяются следующими основными параметрами.

1. *Статическая характеристика* датчика представляет собой зависимость изменения выходной величины от изменения входной величины, т.е. $y = f(x)$.

2. *Чувствительность датчика* есть отношение приращения выходной величины к приращению входной величины: $S = dy/dx$

3. *Порог чувствительности* датчика – наименьшее значение входной величины, которое вызывает появление сигнала на выходе.

Зона нечувствительности – зона, в пределах которой при наличии входного сигнала на выходе датчика сигнал отсутствует.

4. *Инерционность датчика* – это время, в течение которого выходная величина принимает значение, соответствующее входной величине. Инерционность датчика характеризуется показателем инерции (временем переходного процесса). В теории автоматического управления инерцию динамического звена (датчика) принято характеризовать постоянной времени.

Помимо информации от различных датчиков, в системах управления широко используется информация от разнообразных измерительных приборов.

Измерение физической величины заключается в сравнении ее с соответствующей единицей измерений. Нахождение значения физической величины опытным путем с помощью специальных технических средств называется измерением. При измерении происходит преобразование измеряемой величины в сигнал, удобный для наблюдения или для дальнейшего преобразования в системе управления. Измерение осуществляется измерительной цепью.

Измерительной цепью называется совокупность технических средств, с помощью которых выполняется процесс измерения (рис. 3.2).

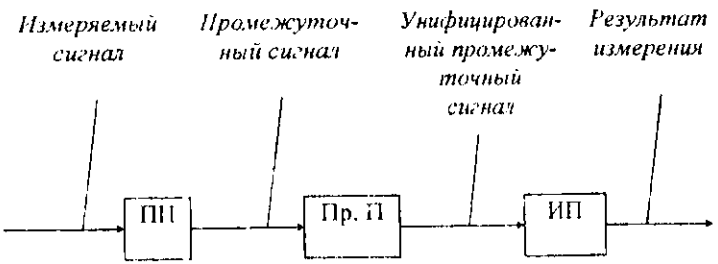


Рис 3.2

Входной сигнал, поступающий в цепь от объекта измерения, называется измеряемым сигналом. Преобразование измеряемого сигнала в требуемый выходной сигнал в измерительной цепи выполняется одним или несколькими элементами, называемыми измерительными преобразователями. Измерительный преобразователь, в который поступает измеряемый сигнал, называется первичным измерительным

преобразователем (ПП на рис. 3.2) или датчиком. Последним измерительным преобразователем в измерительной цепи может быть:

- измерительный прибор;
- регулятор системы автоматического регулирования;
- управляющая вычислительная машина (УВМ), например программируемый контроллер.

Измерительный преобразователь, выходной сигнал которого предназначен для наблюдения, называется измерительным прибором (ИП на рис. 3.2). Остальные преобразователи называются промежуточными (Пр.П).

Эти преобразователи могут быть предназначены для усиления сигнала, его размножения и т.д.

Вид промежуточного сигнала определяется, с одной стороны, принципом действия и конструкцией первичного преобразователя, а с другой – удобством передачи сигнала на требуемое расстояние. Особо следует отметить промежуточный преобразователь, вырабатывающий так называемый унифицированный промежуточный сигнал.

Унифицированные сигналы ГСП

Современное производство требует измерения большого количества различных физических величин. Более того, даже одна физическая величина в зависимости от производственных условий может измеряться различными датчиками. Это требует большого количества типов измерительных приборов, что удорожает их производство и эксплуатацию.

Для сокращения количества типов приборов, используемых промышленностью, введена Государственная система приборов (ГСП). Она предусматривает строго ограниченное количество видов промежуточных сигналов, названных унифицированными, и их предельные значения. Введение унифицированных сигналов существенно уменьшило номенклатуру измерительных приборов – самых сложных и дорогих элементов измерительной цепи.

Выходные сигналы промежуточных преобразователей, как правило, бывают электрические или пневматические. Такие сигналы наиболее удобны для дистанционной передачи. В табл. 3.1 приведены наиболее часто употребляемые в ГСП унифицированные сигналы и пределы их изменения.

Таблица 3.1

Ветвь ГСП	Унифицированный сигнал	Пределы изменения
1. Электрическая		
а) аналоговая	Постоянный ток	0–5; 0–20 мА
	Напряжение постоянного тока	0–10; 0–100 мВ
	Напряжение переменного тока	1–0–1; 0–2 В
	Взаимная индуктивность	0–10;10–0–10 мГн
	Частота	4–8 кГц
б) дискретная	Код	по ГОСТ
2. Пневматическая	Давление сжатого воздуха	20 кПа–0,1 МПа

При выборе вида унифицированного промежуточного сигнала руководствуются длиной канала связи. При длине канала до 300 м можно применять любой вид сигнала, до 0 км – постоянный ток или частотный сигнал, при большей длине – кодированный дискретный сигнал. Кроме того, пневматический сигнал является пожаро- и взрывобезопасным, код - наиболее помехоустойчивый сигнал.

При измерении температуры терморезисторами и термопарами унифицированные сигналы не используются.

Измерительные приборы

Измерительные приборы предназначены для визуального представления величины измеряемых сигналов. По метрологическому назначению приборы делятся на технические, лабораторные и образцовые.

Технические приборы предназначены для работы в производственных условиях. Класс точности этих приборов обычно от 0,25 до 2,5 (допустимая погрешность составляет от 0,25 до 2,5% от максимального значения шкалы).

Лабораторные приборы применяют для точных измерений в лабораторных условиях, а также для поверки технических приборов. Класс точности лабораторных приборов 0,05; 0,1; 0,2.

Образцовые приборы служат для поверки технических и лабораторных приборов. Класс точности этих приборов 0,005; 0,02; 0,05.

По виду выходного сигнала различают приборы компарирующие, показывающие, самопишущие, интегрирующие, регулирующие.

Компарирующие приборы (измерительные приборы сравнения) служат для непосредственного сравнения измеряемой величины с заданной.

У показывающих приборов (или приборов с индикацией показаний) величина измеряемого параметра указывается отсчетным устройством; в последнее время часто применяются цифровые отсчетные устройства.

Самопишущие (или регистрирующие) приборы имеют устройство для автоматической записи измерений.

В интегрирующих приборах предусмотрено непрерывное суммирование (интегрирование) мгновенных значений измеряемой величины по времени.

Регулирующие приборы имеют встроенные блоки для выдачи электрических или пневматических управляющих сигналов, непрерывных (например, для управления по ПИД-алгоритму) или для двух- или трехпозиционного регулирования.

Выпускаются также комбинированные приборы, выполняющие несколько из перечисленных функций.

Структура датчиков и измерительных приборов

Измерительная техника прошла несколько этапов развития. Каждый из них оставил свои оригинальные и эффективные решения.

Первые измерительные и регулирующие устройства были механическими. Это и центробежный регулятор паровой машины Уатта, и поплавковые регуляторы уровня жидкости. Механические устройства такого рода до последнего времени применялись в автомобилях.

Необходимость передачи сигналов на значительные расстояния и удобство обработки электрических сигналов вызвало появление датчиков с электрическим выходом и электрических автоматических измерительных приборов. Датчики и приборы этого периода были в основном аналоговыми. Из технических решений этого периода, широко применяющихся в литейном производстве, можно отметить измерение температур термометрами сопротивления и термопарами.

Часто измеряемая величина в датчиках этого периода преобразуется в перемещение чувствительного элемента, а перемещение этого элемента измеряется и преобразуется в выходной сигнал датчика. Для преобразования перемещений чувствительных элементов различных датчиков в выходной электрический сигнал широко используются дифференциально-трансформаторные преобразователи.

Новые широкие возможности для решения различных задач измерений открыла вычислительная техника. Цифровые сигналы более устойчивы к помехам и ослаблению сигналов при их передаче в регулирующее устройство, к ошибкам операторов, чем аналоговые. Но главное заключается в том (если говорить непосредственно об изме-

рениях), что появилась возможность более точно и простыми средствами учитывать некоторые сопутствующие явления, ранее приводившие к ошибкам измерений.

Вычислительная техника в свою очередь позволила использовать для целей контроля и измерения весьма сложные физические явления и расширить перечень параметров, доступных для контроля и измерения. Этот период характеризуется появлением двуцветных и многоцветных пирометров, которые анализируют поглощение излучения в разных частях спектра и позволяют тем самым повысить точность измерения температуры.

В настоящее время применяются методы измерения и приборы, появившиеся на разных этапах этого процесса. Это обусловлено тем, что существующий метод либо удовлетворяет требованиям производства, либо является более экономичным, либо не освоен выпуск приборов нового типа.

Выбор типа и структуры датчиков и измерительных приборов подчиняется следующим требованиям:

- должна быть обеспечена достаточно высокая чувствительность средства измерения;
- выходной сигнал должен соответствовать способу его дальнейшего использования;
- окружающая среда, различные возмущающие воздействия не должны влиять (или влиять в минимальной степени) на точность результата измерения контролируемого параметра.

В автоматизированных системах обычно используют косвенные методы измерений, так как непосредственно измерить контролируемую величину автоматическими средствами часто бывает невозможно. В таких случаях о значении контролируемой величины судят по косвенному показателю, то есть выбирают какую-нибудь другую физическую величину, связанную с измеряемой величиной, и измеряют имеющимися средствами. Контролируя эту величину (которая и называется косвенным показателем), можно судить о значении интересующей нас величины. Так, о температуре судят по изменению электрического сопротивления проводника или термоЭДС между проводниками из разных сплавов, о давлении – по деформации упругого элемента датчика.

Измерение физической величины по косвенному показателю может привести к большим ошибкам, если на выбранный косвенный показатель, помимо измеряемой величины, существенно влияют какие-либо другие факторы (возмущающие воздействия). Стремятся выбирать такие косвенные показатели, которые мало зависят от воз-

мущающих воздействий. Тем не менее, обычно полностью избежать таких воздействий не удается. Примером возмущающего воздействия, существенно влияющего на результаты различных измерений, является температура.

В аналоговых приборах для компенсации возмущающего воздействия (обычно температуры) применяются мостовые схемы измерения. Сущность их заключается в том, что два чувствительных элемента (так называемые рабочие датчики) подвергаются физическому воздействию, величина которого измеряется. Два других таких же элемента этому воздействию не подвергаются, но находятся в той же среде и, следовательно, подвергаются только сопутствующему возмущающему воздействию, например имеют ту же температуру (компенсационные датчики). Эти датчики соединяются в мостовую схему, при помощи которой и определяется значение измеряемой величины с учетом возмущающего воздействия.

Рассмотрим наиболее простой случай, когда измеряемым сигналом является электрическое сопротивление. Он встречается довольно часто, например, при измерении перемещений, усилий, при анализе состава газов и др.

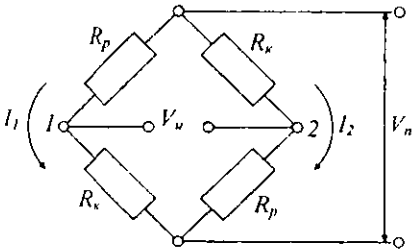


Рис. 3.3

Пусть о значении некоторой величины x судят по величине сопротивления датчика R. Но величина этого сопротивления зависит также от возмущающего воздействия t: $R = f(x, t)$. Мостовая измерительная схема показана на рис. 3.3. Все сопротивления этого моста одинаковы, но два из них составлены из рабочих датчиков и имеют при измерении сопротивление R_p, два других составлены из компенсационных датчиков и имеют сопротивление $R_к$. К одной диагонали моста подводится напряжение питания $V_п$, на другой измеряется раз-

ность потенциалов V_u, характеризующая значение измеряемой величины x.

Для некоторых начальных условий x_0, t_0 имеем:

$$R_0 = f(x_0, t_0).$$

Полный дифференциал функции R имеет вид:

$$dR = \frac{\partial R}{\partial x} dx + \frac{\partial R}{\partial t} dt,$$

где dx и dt – соответственно приращения по x и t.

При переходе к конечным приращениям получим:

$$\Delta R \cong \frac{\partial R}{\partial x} \Delta x + \frac{\partial R}{\partial t} \Delta t.$$

Надо отметить, что это приближённое равенство тем ближе к точному, чем меньше зависимость $R = f(x, t)$ отличается от линейной относительно x и t.

Обозначив первое и второе слагаемые в правой части последнего равенства как ΔR_x и ΔR_t, получим для сопротивлений рабочего и компенсационного датчиков:

$$R_p = R_0 + \Delta R_x + \Delta R_t$$
$$R_k = R_0 + \Delta R_t$$

Обращаясь к мостовой схеме (см. рис. 3.3), заметим, что в правой и левой ветвях моста текут одинаковые токи:

$$I_1 = I_2 = \frac{V_n}{R_p + R_k},$$

а падения напряжения в точках *1* и *2* составят

$$\Delta V_1 = I_1 R_p; \quad \Delta V_2 = I_2 R_k.$$

Разность между ΔV_1 и ΔV_2, измеряемая прибором, равна:

$$V_u = \Delta V_1 - \Delta V_2 = I_1 R_p - I_2 R_k = V_n \frac{\Delta R_x}{2(R_0 + 0{,}5\Delta R_x + \Delta R_t)}.$$

Если при этом $R_0 >> \Delta R_x + \Delta R_t$, то V_u в некотором масштабе довольно точно отражает зависимость косвенного показателя от x, а влияние на него возмущения t мало.

При разработке прибора стремятся к тому, чтобы зависимость R от x и t была близка к линейной. Тогда при больших величинах Δx и Δt погрешность показаний прибора будет находиться в пределах допустимой, следовательно, прибор будет иметь большой диапазон измерения параметра x и допустимых величин t.

В цифровых приборах (если только это не обычный аналоговый прибор, представляющий только результат измерения в цифровой форме), схема вычисления значения x может быть, например, такой.

В память вводится функция $R = f(x, t)$. Она может быть введена или в виде аналитической, или в виде экспериментальной зависимости, или даже в виде таблицы, содержащей значения R, полученные экспериментальным путем при разных значениях x и t.

С датчиков R и t (здесь значение t может определяться датчиком любого типа) вводятся их текущие действительные значения R_o и t_o.

Эти значения подставляются в формулу для R и находится значение x.

При известной зависимости $R = f(x, t)$ решение получить довольно просто. Для нахождения x можно использовать таблицу.

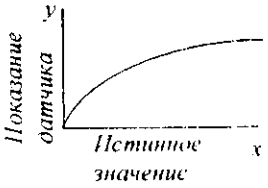
t	x_1	x_2	...	x_j	...	x_n
t_1	r_{11}	r_{12}	...	r_{1j}	...	r_{1n}
...	...	...	...	...	...	...
t_i	r_{i1}	r_{i2}	...	r_{ij}	...	r_{in}
...	...	...	...	...	...	...
t_m	r_{m1}	r_{m2}	...	r_{mj}	...	r_{mn}

В этом случае программа выполняет следующие действия:

- производит перебор табличных значений t, сравнивая их со значением t_o и находя ближайшее большее и меньшее к нему значения из таблицы;
- для каждого из этих значений производит перебор табличных значений R, сравнивая их со значением R_o и находя ближайшее большее и меньшее к нему значения из таблицы, а также соответствующие значения x;
- выполняя интерполяцию найденных значений x, находит действительное значение x_o.

Для пояснения поиска действительного значения x по таблице ниже приведен более простой *алгоритм*, который обычно используется для определения истинных значений измеряемых величин по показаниям датчиков.

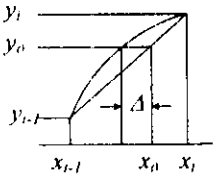
Как правило, снимаемая с датчика информация связана с истинным значением измеряемой переменной x зависимостью вида $y=f(x)$, где y – выходной сигнал датчика, $f(x)$ – в общем случае некоторая нелинейная, но монотонная функция (рис. 3.4,а). Значение x можно получить, подобрав подходящую зависимость $y=f_1(x)$ или используя таблицу. При использовании табличного метода следует получить экспериментальным путем таблицу пар значений $x_1,y_1; x_2,y_2;...x_n,y_n;...$ (рис. 3.4,б).



а

x_1	x_2	..	...	x_n
y_1	y_2	..	...	y_n

б



в

Рис. 3.4

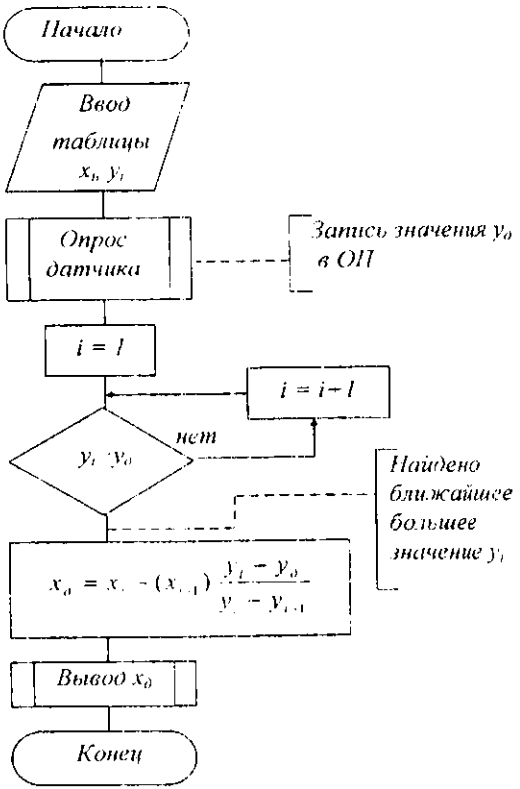


Рис. 3.5

Алгоритм получения истинного значения x (рис. 3.5) выполняет перебор табличных значений $y_i (i=1, n)$ и сравнивает их с показанием датчика y_0. При выполнении условия $y_{(i-1)} < y_0 < y_i$ (для данного примера монотонновозрастающей функцией) оказывается найденным ближайшее большее табличное значение y_i. За действительное значение x можно принять или x_i, или $x_{(i-1)}$, или для повышения точности провести, как это сделано в приводимой программе, линейную интерполяцию, суть которой поясняется на рис. 3.4,в.

Таким образом, использование вычислительной техники позволяет:

– выбирать для измерений по косвенным показателям не только линейные, но и монотонные их зависимости от измеряемых величин;

– выполнять компенсацию влияния различных возмущающих воздействий;

– упростить конструкции датчиков, а для учета возмущающих воздействий применять приборы, специально предназначенные для этого.

В последнее время появились многофункциональные приборы. Например, выпускается прибор, с помощью которого можно сразу измерять температуру, уровень и расход различных сред (температура в этом приборе измеряется «бесплатно», поскольку измерение других параметров в этом приборе требует введения температурной поправки).

§2. Измерение основных механических и физических величин

Контроль положения, размеров и скоростей

Контроль положения деталей механизмов и машин выполняется различными конечными и путевыми выключателями и переключателями, представляющими собой датчики релейного типа. Существуют контактные и бесконтактные электрические выключатели. Такую же роль выполняют пневматические и гидравлические клапаны с путевым управлением.

Современные датчики обычно бесконтактные, они надёжно работают при повышенных температурах, вибрации, влажности. Обычно это индуктивные, трансформаторные датчики, датчики ЭДС Холла, магнитодиоды.

На рис. 3.6 показан принцип действия простейшего индуктивного датчика. Магнитная система датчика образована сердечником *1*, якорем *2* и электрической обмоткой *3*. Якорь закрепляется на движущейся части машины, положение которой контролируется конечным выключателем. При приближении якоря к сердечнику магнитное сопротивление системы «сердечник – якорь» уменьшается, и напряжение на выходе электронного блока *4* изменяется. Последнее и является сигналом того, что движущийся механизм находится в определённом положении. В промышленных датчиках номинальное расстояние чувствительности S_n может быть в пределах 15–40 мм. Оно проверяется на стандартной стальной пластине со стороной квадрата $3S_n$ и толщиной 1 мм. Эффективное расстояние чувствительности S_r может регулироваться в пределах $S_r \leq 1{,}5\ S_n$.

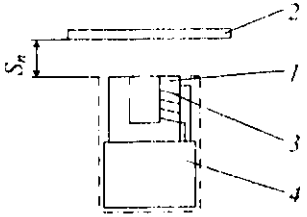


Рис. 3.6

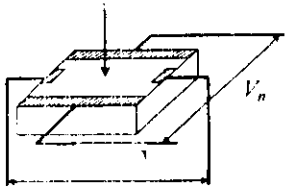
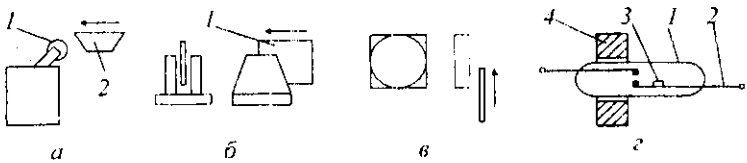


Рис. 3.7

Для устранения помех, которые могут быть вызваны соседними датчиками или близко расположенными металлическими частями машины, для разных вариантов исполнения расстояние между соседними датчиками должно быть не менее 80–120 мм, а для очень чувствительных датчиков не допускается и присутствие металлических элементов ближе 15–40 мм.

На рис. 3.7 показан принцип действия датчика ЭДС Холла. Датчик представляет собой полупроводниковую пластину, к которой припаяны металлические проводники. К одной паре электродов подводится напряжение питания $V_п$, с другой пары снимается сигнал датчика. Действие датчика заключается в том, что когда он оказывается в магнитном поле (на рисунке показан вектор магнитной индукции B), на его электродах появляется ЭДС, и с них снимается напряжение $V_с$.

На рис. 3.8 показаны конечные выключатели устаревших, но ещё иногда используемых на действующем оборудовании типов. Обычно эти устройства имеют (рис. 3.8,а) ролик *1* на поворотном рычаге или шток, на который нажимает движущийся механизм (для этого на последнем закрепляется кулачок *2*). Нажатие кулачка вызывает перемещение рычага. Оно используется для переключения электрического контакта, золотника (в пневматических клапанах) или изменяет емкость или индуктивность бесконтактного датчика. На рис. 3.8,б,в показаны некоторые варианты бесконтактных переключателей.



а *б* *в* *г*

Рис. 3.8

Так, датчик по рис. 3.8,б срабатывает, если в его зазор вводится алюминиевая пластина, а датчик по рис. 3.8,в – если к его чувствительной поверхности приблизится (на расстояние менее 16 мм) стальная пластина.

Датчики контактного типа быстро изнашиваются и должны заменяться через 1,5–2 года работы.

Геркон (герметичный контакт, магнитоуправляемый контакт) представляет собой герметичный корпус, например стеклянную колбу *1*, в которую впаяны два электрода *2* из хорошо пружинящего материала (рис. 3.8,г). На одном из электродов закреплен постоянный магнит 3. При перемещении вдоль корпуса постоянного магнита *4* магнит *3* притягивается к нему, и контакт замыкается.

Пневматический клапан с путевым управлением показан на рис. 3.9. Клапан состоит из корпуса *1*, золотника *2* со штоком *3* и пружины *4*. В исходном состоянии пружина отжимает золотник в левое положение. Воздух, поступающий из сети в отверстие *а*, выходит из клапана через отверстие *в*. При нажатии на шток клапана золотник перемещается в правое положение, и давление в трубопроводе, связанном с отверстием *в* клапана, сбрасывается через отверстие *б* в атмосферу. Таким образом, входным сигналом для этого клапана является положение штока (нажат или не нажат), а выходным – давление в отверстии *в*.

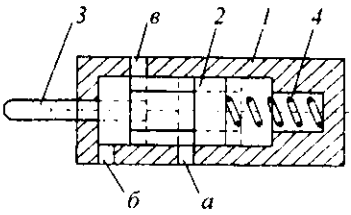


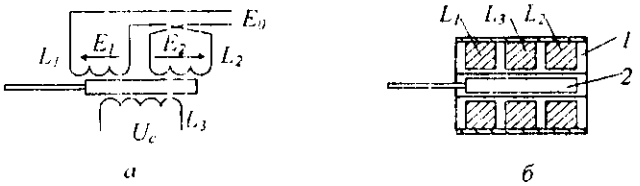
Рис. 3.9

Для контроля положения механизмов используются также фотоэлементы, например фотодиоды, и ультразвуковые устройства, определяющие расстояние до объекта.

Для контроля наличия материалов и отдельных предметов на конвейерах часто используются флажковые сигнализаторы (см. рис. 3.23).

Для измерения перемещений применяются индуктивные и трансформаторные датчики. Они основаны на изменении индукции электрических катушек при перемещении в них сердечников из магнитного материала. На рис. 3.10 показан дифференциально-трансформаторный преобразователь (ДТП). Этот датчик представляет собой (рис. 3.10,б) катушку с тремя обмотками L_1, L_2, L_3, намотанными на изоляционный каркас *1*. Внутри катушки перемещается плунжер (сердечник) *2*. Электрическая схема датчика показана на рис. 3.10,а. Обмотка L_3 получает питание от переменного тока (50Гц–10кГц). Пе-

ременное магнитное поле наводит в обмотках L_1 и L_2 ЭДС E_1 и E_2. Параметры L_1 и L_2 одинаковы и включены навстречу друг другу. Поэтому, если сердечник стоит посередине катушки, $E_1=E_2$, и на выходе $E_0=E_1-E_2=0$. Перемещение сердечника нарушает магнитную симметрию, и на выходе датчика появляется напряжение E_0.



а *б*

Рис. 3.10

Чувствительность таких датчиков может достигать 0,12–0,8 мВ/мкм. Измеряются перемещения от 0,1 мм до десятков миллиметров. Погрешность составляет 0,5–1%. Влияние температуры невелико.

Некоторые датчики перемещений применяются в составе датчиков для измерения перемещений чувствительных элементов (например, в датчиках давлений и усилий).

Реостатные датчики представляют собой переменное электрическое сопротивление (реостат), ползунок которого связан с элементом, перемещение которого измеряется.

Преимущества реостатного датчика – высокий уровень выходного сигнала (порядка нескольких вольт), который легко измерить, обычно достаточная точность, простая конструкция. Недостатками являются: влияние температуры, ограниченная долговечность и невысокая надежность вследствие износа реостата. Применяется для измерения небольших перемещений, например прогиба мембраны в датчиках давления.

Тензометрические датчики основаны на явлении изменения электрического сопротивления тонкой металлической проволоки (или ленты) при ее растяжении. Стандартный тензометрический датчик представляет собой проволоку диаметром 0,025 мм, наклеенную на тело, удлинение которого измеряется. Недостатками таких датчиков являются:

- существенная зависимость электрического сопротивления от температуры; для устранения температурной погрешности используют мостовые схемы (в аналоговых системах) или вносят поправки программными средствами;
- изменение сопротивления в рабочем диапазоне датчика не превышает 1%; измерять такие изменения с большой точностью трудно.

Достоинством тензометрических датчиков являются их малые габариты, их легко закрепить на любой части машины и измерять таким образом усилия в ней. Известно их применение при автоматическом контроле растяжения колонн машин литья под давлением (что нужно для определения усилия запирания машины).

Контроль скорости механизмов обычно производится по частоте вращения валов приводов или дифференцированием функции перемещения механизма от времени.

Индукционный датчик (рис. 3.11, а) представляет собой маленький генератор: его ротор *1*, представляющий собой магнит, соединяется с валом, частота вращения которого измеряется. При вращении ротора в обмотках *2* полюсных наконечников *3* статора возникает ЭДС, пропорциональная частоте вращения ротора.

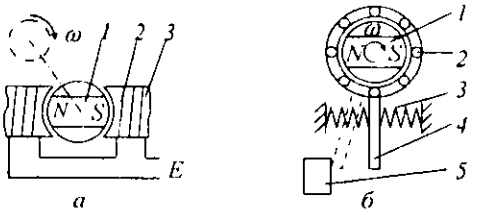


Рис. 3.11

Реле контроля скорости (РКС) является датчиком скорости с релейным выходным сигналом. Этот датчик (рис. 3.11,б) имеет ротор *1* с постоянным магнитом и статор *2* в виде кольца с обмоткой типа «беличье колесо», как в короткозамкнутых роторах асинхронных электродвигателей. Кольцо удерживается в среднем положении пружинами *3*, воздействующими на рычаг *4*. Ротор соединяется с валом, вращение которого контролируется. При вращении ротора в обмотке кольца *2* наводится электрический ток. Этот ток, взаимодействуя с магнитным потоком вращающегося ротора, создает на кольце вращающий момент. Это приводит к повороту рычага *4* на угол, зависящий от жесткости пружин *3* и частоты вращения ротора. При некоторой частоте вращения происходит срабатывание датчика положения, например конечного выключателя *5*.

Реле контроля скорости часто применяется для контроля работы систем ленточных транспортеров путем контроля вращения неприводных роликов, а также для контроля вращения катков катковых смесителей (бегунов).

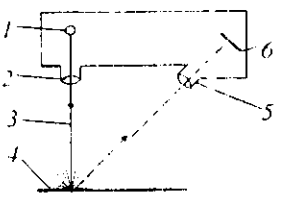


Рис. 3.12

Лазерные системы контроля длин, размеров и перемещений обычно применяются в машиностроении для точного, быстрого и бесконтактного измерения нужных параметров. На их результаты значительно меньше влияют внешнее освещение, вибрации, запылённость воздуха, чем при других методах измерений.

В литейных процессах находят применение простейшие варианты этих устройств как датчики наличия – отсутствия контролируемого объекта. На рис. 3.12 показано такое устройство, где *1* – источник излучения; *2* – линза; *3* – лазерный луч; *4* – контролируемая поверхность; *5* – линза; *6* – фотодетектор.

Лазерный луч рассеивается на контролируемой поверхности. Часть рассеянного отражённого света попадает в линзу *5* и направляется ею на чувствительный фотодетектор *6*.

Используется этот прибор для:

– контроля уровня металла в литниковой чаше при заливке (определяется наличие металла на специальной площадке, примыкающей к литниковой чаше);

– определения положения литниковой чаши при позиционировании заливочной установки относительно литниковой чаши.

В последнем случае система поиска литниковой чаши организует сканирование (– обегание, просмотр) лазерным лучом поверхности формы. Пока излучение падает на поверхность формы, рассеянное излучение с поверхности попадает на фотодетектор. Если же луч падает в литниковую воронку или стояк, большая часть отражённого света экранируется вертикальными поверхностями (чаши или стояка) и, соответственно, не попадает на фотодетектор. Таким образом фиксируется положение литниковой чаши.

В гидравлических механизмах скорость может быть измерена датчиком расхода гидравлической жидкости, а перемещения – интегрированием расхода по времени.

Контроль струи металла

Средства видеотехники весьма удобны для контроля механизмов, работающих с жидким металлом. Они используются для контроля состояния стопорного механизма. Увеличение внутреннего диаметра стопорной втулки при износе или засорение ее шлаком вызывает изменение размеров и формы струи. Для контроля струи применяются

две фотодиодные линейки, измеряющие ширину струи в двух взаимно перпендикулярных направлениях. Искажение формы поперечного сечения струи фиксируются этими датчиками и служат сигналом о появлении неисправности.

Измерение усилий и масс

Обычно используются силоизмерительные устройства с упругим чувствительным элементом (например, пружиной), тензометрические, магнитоанизатропные (магнитострикционные) и основанные на пьезоэффекте

При использовании пружин платформа измерительного устройства опирается на пружины, последние под действием нагрузки сжимаются, а перемещение платформы измеряется каким-либо датчиком перемещения, например дифференциально-трансформаторным преобразователем.

В тензометрических устройствах нагрузка воспринимается упругими элементами (месдозами), например стержнями или трубками, которые под действием этого усилия деформируются (сжимаются в продольном направлении и растягиваются в поперечном). Их растяжение измеряется тензометрами.

В *магнитоанизатропных* (магнитострикционных) силоизмерительных датчиках используется магнитная анизатропия некоторых материалов, например Fe-Cr-Al сплава. Этот эффект заключается в том, что при упругой деформации материала его магнитная проницаемость изменяется, причем в направлении сжимающего усилия и перпендикулярном к нему – в разные стороны. В сердечнике *1* магнитоанизатропного силоизмерительного датчика (рис. 3.13) имеется 4 отверстия, в которых помещаются две электрических обмотки *2* и *3* во взаимно перпендикулярных плоскостях. К одной из них подведен переменный ток. В отсутствии нагрузки материал сердечника изотропен, поэтому магнитное поле обмотки возбуждения не индуцирует ток в другой обмотке. При деформации сердечника его материал становится анизатропным, и магнитное поле обмотки возбуждения индуцирует ток во второй обмотке.

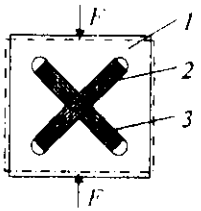


Рис. 3.13

Тензорезисторные и магнитострикционные датчики используются в интервале температур от – 40 до +50^{0}С, погрешность измерения тензорезистивных датчиков 0,1–0,5%, магнитострикционных 1–1,5%.

Известны тензорезисторные датчики, которые применяются до температуры +150^{0}С. Такой датчик показан на рис. 3.14. В корпусе датчика 1 помещен упругий элемент (мембрана) *2* с упором *3*. Снизу к упругому элементу прикреплены стеклянные стойки *4* с намотанными на них двумя тензометрами *5* (несколько витков константановой проволоки диаметром 0,07 мм). Ниже на пластине *6* помещаются два термокомпенсационных тензометра *7*.

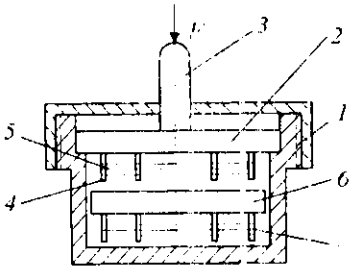


Рис 3.14

При приложении к упору измеряемого усилия *F* элемент *2* прогибается и тензометрическая проволока *5* растягивается, изменяя свое сопротивление. Влияние температуры на выходной сигнал датчика устраняется следующим образом. Компенсационная часть – пластина *6* – не нагружается, но имеет (как и тензометры на ней) ту же температуру, что и мембрана *2* и тензометры *5*. При соединении тензометров *5* и *7* в мостовую схему влияние температуры на показания датчика автоматически компенсируется.

Используется и другой, более современный метод компенсации влияния температуры. Для этого она измеряется датчиком температуры, и в выходной сигнал вычислительное устройство вносит соответствующую поправку.

Пьезоэлектрические датчики представляют собой пластину из материала с хорошо выраженными пьезоэлектрическими свойствами (кристалла пьезокварца, пьезокерамики), зажатую между двумя металлическими обкладками. Когда через эти обкладки к кристаллу прикладывается сжимающее напряжение, на обкладках возникает ЭДС, пропорциональная приложенному усилию.

Измерение давлений, расхода и уровня жидкостей

Для измерения давлений и разности давлений жидкостей и газов используются измерительные приборы, называемые манометрами. Различают следующие разновидности манометров:

манометр абсолютного давления – для измерения давления, отсчитываемого от абсолютного нуля;

манометр избыточного давления – для измерения разности между абсолютным давлением измеряемой среды и давлением окружающей среды;

вакуумметр – для измерения давления разреженного газа;

мановакуумметр – для измерения избыточного давления и давления разреженного газа;

дифференциальный манометр – для измерения разности двух давлений.

По принципу действия различают следующие виды манометров: жидкостные, грузопоршневые, деформационные (мембранные, сильфонные, трубчато-пружинные), электрические (емкостные, пьезоэлектрические, сопротивления), ионизационные, термокондуктометрические.

В системах автоматизации применяются как манометры, имеющие электрический, пневматический или цифровой выходной сигнал, так и датчики давления.

Датчики давления (рис. 3.15,а – аналоговый, рис. 3.15,б – релейного типа, или реле давления) состоят из корпуса *1*, упругого элемента (мембраны) *2* и штока *3*. При подаче давления *p* в датчик прогиб мембраны передается штоком в первом случае на плунжер трансформаторного датчика перемещений *4*, во втором – на рычаг *6*, который воздействует на конечный выключатель *8*. В исходное положение рычаг *6* отжимается пружиной *7*. Входными сигналами этих датчиков является давление *p*, выходными – напряжение для аналогового датчика и замыкание конечного выключателя для релейного датчика. В других конструкциях для измерения перемещения мембраны применяются индуктивные датчики или реостаты.

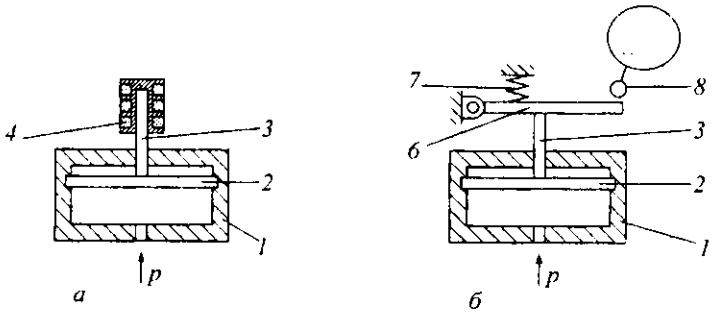


Рис. 3.15

В описанных датчиках используется такой же принцип действия, как в деформационных мембранных манометрах. Существуют датчики давления, основанные на других принципах действия. Так, в системах автоматизации могут использоваться пьезоэлектрические датчики давления.

Для уменьшения относительной погрешности измерения прибор или датчик для измерения давления следует выбирать таким образом, чтобы номинальное давление (максимальное давление, измеряемое прибором) было не менее 3/4 диапазона измерения при мало меняющемся давлении и не менее 2/3 в случае переменного давления.

Расход жидкостей и газов измеряется расходомерами. Некоторые расходомеры оснащены устройствами интегрирования по времени.

Расходомеры переменного перепада давлений (расходомеры с сужающими устройствами) основаны на принципе измерения (посредством дифманометра) перепада давлений на диафрагме или каком-либо другом сужающем устройстве (сопле или трубе Вентури), установленном в трубопроводе (рис. 3.16,а). Перепад давлений на сужающем устройстве $p_1 - p_2$ (разность давлений до и после сужающего устройства) пропорционален квадрату расхода (на рис. 3.16,а: *1* – диафрагма, *2* – дифманометр).

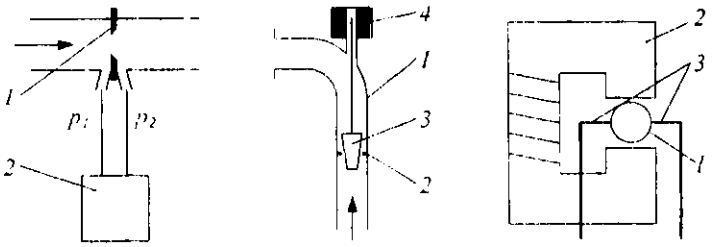


Рис. 3.16

Ротаметр (расходомер постоянного перепада давлений) показан на рис. 3.16,б. Он состоит из корпуса *1*, (части трубопровода, расход в котором измеряется), диафрагмы *2*, конического поплавка *3* и датчика перемещений *4*. Ротаметры должны устанавливаться строго вертикально, а поток должен быть направлен снизу вверх. При прохождении по трубопроводу потока жидкости или газа поплавок приподнимается до создания в щели между поплавком и диафрагмой постоян-

ного перепада давлений, уравновешивающего вес поплавка. Высота подъема поплавка измеряется датчиком перемещений.

Ротаметры могут измерять очень малые расходы различных сред, в том числе агрессивных.

Электромагнитные (индукционные) расходомеры (рис. 3.16,в) основаны на зависимости ЭДС, возникающей при движении электропроводящей жидкости в магнитном поле, от расхода этой жидкости. Они предназначены для измерения расхода растворов и пульп с удельной электрической проводимостью 10^{-3}–10 См/м (Сименс на метр), т. е. не ниже, чем у технической воды. Участок трубопровода *1*, являющийся частью расходомера, изготовлен из немагнитного материала. Он находится в магнитном поле, создаваемом электромагнитом *2*. В потоке электропроводной жидкости, протекающей по трубопроводу, возбуждается ЭДС, которая снимается электродами 3, вмонтированными в трубопровод.

Показания этих расходомеров практически не зависят от плотности, вязкости жидкости, присутствия в ней пузырьков газа или твердых частиц. Поэтому они применяются для измерения расхода агрессивных, абразивных и вязких жидкостей и пульп, жидких металлов. Их недостаток – требование минимального значения электропроводности измеряемой жидкости. Они измеряют объёмный расход.

Тахометрические расходомеры и счетчики применяются для вязких и агрессивных сред. Существуют шестеренчатые, лопастные, ротационные и другие счетчики. В некоторых случаях применяются вихревые, струйные или тепловые расходомеры.

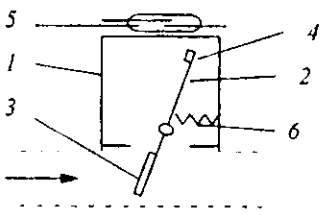


Рис. 3.17

Реле потока является релейным датчиком расхода жидкости и применяется для контроля работы систем охлаждения различных агрегатов (индукторов плавильных печей и др.). Реле потока (рис. 3.17) состоит из корпуса *1*, в котором на оси установлен рычаг *2* с заслонкой *3* и постоянным магнитом *4*. Снаружи установлен геркон *5*. Поток жидкости воздействует на заслонку *3* и поворачивает рычаг *2*, преодолевая сопротивление пружины *6*. При повороте рычага на некоторый угол контакт геркона замыкается.

Уровень жидкостей часто измеряется гидростатическим и поплавковым методами. Применяются также буйковый и емкостной ме-

тоды. В специальных условиях используются акустический, индуктивный, высокочастотный методы. Широко применяются сигнализаторы и реле уровня, которые дают сигнал при достижении уровнем жидкости чувствительного элемента.

При гидростатическом методе измеряется давление столба жидкости, расположенного над точкой измерения, при помощи дифманометра. Для измерения вязких и кристаллизующихся сред используются уровнемеры, измеряющие гидростатическое давление на сильфон или мембрану, помещенные в измеряемую среду.

В поплавковых уровнемерах уровень определяется по положению поплавка, частично погруженного в жидкость. Оно может измеряться каким-либо датчиком положения.

Принцип действия буйковых уровнемеров основан на измерении действующей на буек выталкивающей силы, зависящей от уровня жидкости.

Эти уровнемеры предназначены для однородных, некристаллизующихся и не выпадающих в осадок жидкостей. На результат измерения влияют температура и плотность измеряемой среды.

Акустические уровнемеры предназначены для бесконтактного измерения уровня жидкостей, в том числе вязких, налипающих, выпадающих в осадок. Принцип действия основан на локации уровня звуковыми импульсами, проходящими через газовую среду и отражающимися от границы раздела сред газ – измеряемая среда.

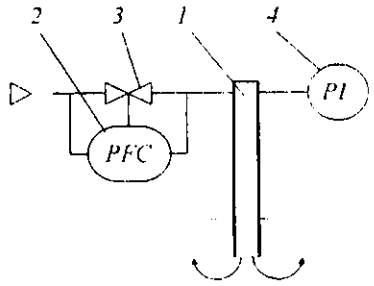


Рис. 3.18

Измерение уровня жидких металлов осложняется их высокой температурой и химической активностью, налипанием шлаков на датчик. Одним из способов обойти эти затруднения является использование барботажного (пневмометрического) метода (рис. 3.18).

Трубка *1* погружена в жидкий металл. В трубку подается инертный газ (аргон, азот) через регулятор перепада давления *2*, который поддерживает постоянный перепад давления на своем регулирующем клапане *3*, в результате чего обеспечивается постоянный расход газа через этот клапан. Газ вытесняет металл из трубки и барботирует к поверхности металла вне трубки. Давление газа в трубке *1*, пропорциональное уровню металла, измеряется манометром *4*.

Сигнализаторы уровня жидкостей обычно используют буйковый, поплавковый или емкостной метод. Последний изложен при описании контроля сыпучих тел.

Измерение расхода и уровня сыпучих тел

Расход сыпучих материалов при конвейерной транспортировке измеряется при помощи взвешивающих транспортеров, которые представляют собой короткую конвейерную секцию, установленную на взвешивающем устройстве и включенную в конвейерную транспортную систему. Схема устройства для измерения расхода показана на рис. 3.19. Ленточный конвейер *1*, приводимый двигателем *2*, установлен на платформе, вес которой измеряется датчиками веса *3*. Скорость транспортера измеряется датчиком скорости *4*. На транспортер поступает сыпучий материал. Длина рабочей части транспортера (длина, на которой находится транспортируемый материал) равна *l*. Сигналы с датчиков *3* и 4 поступают в вычислительное устройство *5*. Результат

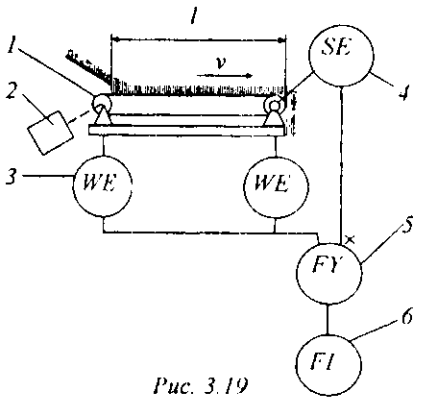


Рис. 3.19

расчета текущего расхода материала выводится на прибор *6*.

Содержание работы по определению расхода материала описано в алгоритме (рис. 3.20). В начале работы программы в нее вводятся исходные данные – масса пустого транспортера m_0 и длина его рабочей части *l*. Затем с датчиков снимаются значения скорости транспортера и его массы вместе с находящимся на нем материалом *m*. Далее вычислительное устройство выполняет следующие расчеты:

– определяет массу материала на транспортере: $m_M = m - m_0$;

– определяет нагрузку на *l* погонный метр транспортера:

$g = m_M/l$;

– перемножает последнюю на скорость транспортера, определяя тем самым массовый расход материала в текущий момент времени: $Q = g \times v$.

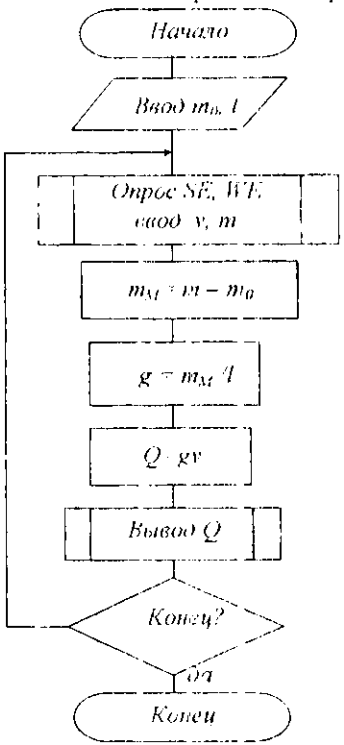


Рис. 3.20

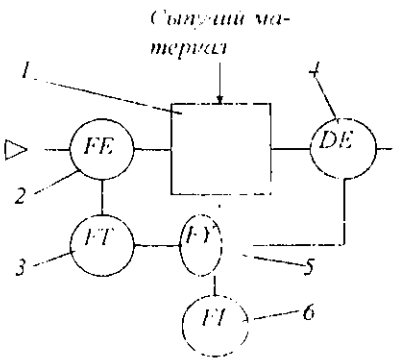


Рис. 3.21

Далее полученное значение расхода выводится на показывающий прибор.

Затем, если не поступила команда на окончание работы, цикл работы повторяется: снова опрашиваются датчики, определяется новое значение расхода, и так далее.

При пневмотранспорте измерение расхода сыпучего материала производится следующим образом (рис. 3.21). Измеряется расход несущего газа $Q_г$ на входе в пневмокамерный насос *1* и плотность аэросмеси $\rho_т$ на выходе из него. Расход несущего газа измеряется, например, диафрагмой *2* и дифманометром *3*. Плотность аэросмеси может определяется плотномером *4*.

Радиоизотопный плотномер состоит из датчика гамма-излучения и его приемника. Они размещаются с двух сторон потока аэросмеси. Воздух практически не поглощает гамма-излучения. Таким образом, по поглощению излучения аэросмесью плотномер определяет объемную массу твердого вещества в аэросмеси $\rho_т$.

Далее преобразователь *5* выполняет умножение сигналов и определяет расход сыпучего материала: $Q = \rho_т \cdot Q_г$.

Прибор *6* показывает текущее значение расхода транспортируемого материала.

Уровень сыпучих материалов измеряется различными методами в зависимости от их свойств и зерни-

стости. *Высокочастотные* уровнемеры применяются для мелкодисперсных (до 5 мм) материалов с насыпной плотностью не менее 1800 кг/м^3, акустические – для материалов с размером кусков от 5 до 300 мм.

Для контроля уровня формовочных и стержневых смесей, а также металлической дроби в дробеметных установках широко применяются емкостные сигнализаторы уровня (рис. 3.22).

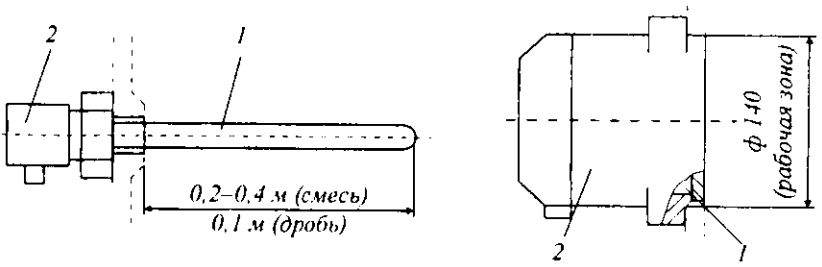
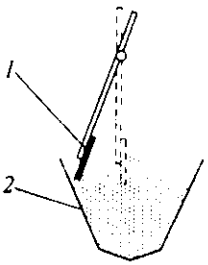


Рис. 3.22

Некоторые модификации этих сигнализаторов используются для контроля электропроводных или неэлектропроводных жидкостей, порошкообразных материалов (молотого угля), кусковых (размером до 150 мм) электропроводных (например, руда) или неэлектропроводных материалов.

В датчиках этого типа используется высокочастотный резонансный метод. В чувствительном элементе датчика размещён колебательный контур. При подходе уровня контролируемой среды к чувствительному элементу изменяется емкость или индуктивность колебательного контура. Изменение параметров колебательного контура преобразуется электрической схемой в напряжение постоянного тока, управляющего, в свою очередь, работой выходного реле. Емкостной датчик со стержневым чувствительным элементом показан на рис. 3.22,а, с плоским (для кусковых материалов) – на рис. 3.22,б. Датчики состоят из чувствительного элемента *1* и корпуса с электрической схемой *2*.



Ри

Для контроля уровня смеси в бункерах над формовочными машинами иногда применяют флажковые сигнализаторы (рис. 3.23). Флажок *1* подвешен над бункером *2*. При заполнении бункера смесью флажок от-

клоняется. Это отклонение фиксирует какой-нибудь датчик положения.

Одной из специфических задач литейного производства является контроль уровня шихты в шахте вагранки. Широко применяются лебедочный и шомпольный датчики. Лебедочный датчик представляет собой лебедку, периодически опускающую груз на шихту. Наличие шихты определяется по ослаблению натяжения троса. Блок лебедки, находящийся в шахте, расположен выше завалочного окна и помещен в защитный кожух, который охлаждается сжатым воздухом. Шомпольный датчик представляет собой стержень, который вводится в шахту вагранки и, если делает полный ход, не встречая шихты, дает сигнал о ее отсутствии. Предложены и применяются также термостатический, фотоэлектрический (с фотоэлементом), радиоизотопный датчики.

Измерение концентрации и плотности жидкостей

Относительное содержание какого-либо компонента в смеси или растворе называется его концентрацией. С изменением содержания компонента в смеси меняются физические свойства раствора. Это используется для измерения концентрации в автоматических приборах. Применяются денсиметрические (измерение плотности), кондуктометрические (измерение электропроводности), фотометрические (измерение оптических свойств), ультразвуковой методы.

Плотность жидкостей измеряют плотномерами. По принципу действия плотномеры делят на поплавковые (ареометрические), весовые (пикнометрические), гидростатические, радиоизотопные.

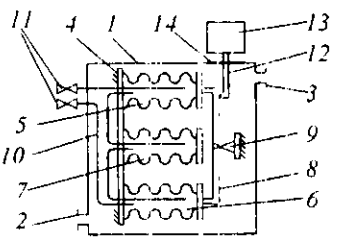


Рис. 3.24

На рис. 3.24 показан сильфонный датчик проточного плотномера. Он имеет вертикальный цилиндрический корпус *1* с двумя боковыми фланцами *2* и *3*, через которые протекает измеряемая жидкость. Внутри корпуса на кронштейне *4* установлены измерительные сильфоны *5* и *6* и компенсационный сильфон *7*. Измерительные сильфоны связаны с коромыслом *8*, которое может поворачиваться вокруг опоры *9*. Внутренние полости сильфонов связаны трубками *10* и заполняются сравнительной жидкостью через краны *11*. Изменения объёма этой жидкости, вызываемые изменением температуры и давления, воспринима-

ются компенсационным сильфоном *7*. Разница перепадов давлений измеряемой жидкости, действующей на сильфоны *5* и *6* снаружи, и сравнительной жидкости, действующей на эти сильфоны изнутри, пропорциональна разности их плотностей. Момент, возникающий на коромысле *8* под действием перепада давлений, воспринимается рычагом *12* и передаётся им в измерительное устройство *13*. Вывод рычага *12* из полости рабочего давления уплотнён мембраной *14*.

§3. Контроль состава и свойств формовочной смеси

Задачи и методы оперативного контроля

Традиционными методами оперативного контроля (экспресс-контроля) качества формовочной смеси являлись испытания влажности смеси, прочности влажного образца смеси на сжатие и его газопроницаемости. С повышением качества формовочной смеси, предназначенной для использования на автоматических формовочных линиях – тщательной подготовки оборотной смеси, включающей своевременное и достаточное её освежение, систематическом контроле фракционного состава, степени оолитизации, формы зёрен, количества мелких частиц, использовании качественных бентонитов – оперативный контроль газопроницаемости утратил своё ведущее значение, поскольку он только отражает особенности смеси, определяемые вышеперечисленными свойствами. Газопроницаемость таких смесей, как правило, намного выше требуемого минимума, а скорость изменения свойств смеси, контролируемых газопроницаемостью, сравнительно небольшая.

При оперативном контроле влажности классический метод – высушивание навески смеси – стал заменяться более производительным контролем насыпного веса. В автоматических устройствах для контроля свойств смеси вместо насыпного веса часто стали использоваться не менее информативные параметры – формуемость или уплотняемость смеси, которые осуществить в автоматическом устройстве гораздо проще, чем определять насыпной вес.

При выборе метода измерения влажности надо иметь в виду, что определение конкретного значения влажности для готовой смеси обычно не является самоцелью. Влажность должна обеспечить требуемые технологические свойства смеси и именно те, которые и проверяются соответствующими технологическими испытаниями. Например, при формовке прессованием практически содержание влаги подбирается таким, чтобы уплотняемость смеси была 40% ± 5%.

Автоматические приборы контроля качества смеси, используемые на современных установках для приготовления формовочной смеси, обычно контролируют те свойства, которые можно оперативно регулировать вводом в смесь воды и связующего. Так, для регулирования влажности используется обычно контроль формуемости или уплотняемости смеси. Для регулирования добавки связующего используются результаты определения предельных напряжений при сжатии и сдвиге. Для определения предельных напряжений при сдвиге образец испытывается на срез, или определяется его твёрдость при вдавливании в него испытательного наконечника.

Физические методы измерения влажности

Формовочная смесь представляет собой гетерогенную систему, состоящую из зёрен кварца, окружённых оболочками связующего, поры которой заполнены воздухом. Смесь содержит от 0 до 5–10% воды. Вода может содержать некоторое количество растворённых солей (для активации бентонита в смесь могут вводиться соли натрия). Смесь может содержать песок из стержней, имеющий остатки связующего (например, синтетические смолы).

В автоматических системах приготовления смеси влажность измеряется косвенными методами, путём измерения некоторых её физических или технологических свойств, зависящих от влажности.

Ёмкостной высокочастотный метод измерения влажности основан на зависимости от влажности активной и реактивной составляющих электрической проводимости смеси при пропускании через неё электрического тока. При повышении частоты тока относительная доля активной составляющей проводимости уменьшается. Кроме того, на реактивную составляющую меньше влияют различные возмущающие воздействия (колебания состава смеси, наличие растворимых солей и др.).

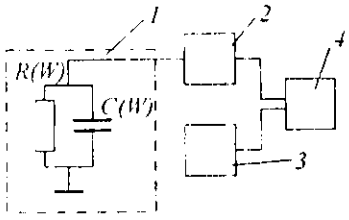


Рис. 3.25

Ёмкостной высокочастотный влагомер, функциональная схема которого показана на рис. 3.25, содержит датчик влажности *1*, измерительный генератор *2*, опорный генератор *3* и измерительный блок *4*.

При попадании в датчик влажности формовочной смеси в колебательный контур измерительного генератора вводятся активное *R(W)* и ёмкостное *C(W)* сопротивления смеси, зависящие от её влажности. Как следствие этого изменяется

частота колебаний измерительного генератора. Опорный генератор вырабатывает колебания постоянной частоты. В измерительном блоке вырабатывается постоянное напряжение, пропорциональное разности частот измерительного и опорного генераторов, оно преобразуется в аналого-цифровом преобразователе в цифровой выходной сигнал.

Для устранения погрешностей, связанных с изменениями температуры, измерительный генератор помещён в термостат, в котором поддерживается температура около 45^0 С, а в опорном генераторе использован кварцевый резонатор с малым температурным коэффициентом.

Применение в промышленности различных физических методов для контроля влажности зависит от специфики отрасли.

Инфракрасный метод, основанный на использовании диффузионного отражения инфракрасных лучей от исследуемого образца влажного материала, применяется в ряде отраслей и может оказаться перспективным для контроля влажности формовочных смесей.

Кондуктометрический метод измерения влажности основан на измерении электрической проводимости материалов. Кондуктометрические влагомеры при контроле формовочных смесей имеют значительную погрешность, связанную с поляризационными процессами на границе раздела сыпучего материала с измерительными электродами, изменениями химического состава компонентов смеси, наличием переменного количества солей (активация бентонита производится введением в смесь соды). Существенно влияние и насыпной плотности, которая также является нестабильным фактором. Трудно измерять очень высокое сопротивление смеси, которое имеет формовочная смесь в рабочем интервале влажности (менее 3–5%).

Нейтронный метод измерения влажности чувствителен к наличию в анализируемом веществе водорода в соединениях, отличных от H_2O и может оказаться непригодным для контроля формовочных смесей, содержащих остатки стержневой смеси.

На результаты измерений влажности влияют колебания плотности смеси в образце, налипание смеси и её высыхание на деталях датчика, высокая температура смеси. Иногда датчик выполняют в виде щупа, который вводится в поток смеси (например, размещается в чаше смесителя) или размещается в весовом бункере над смесителем. Колебания плотности смеси в этих случаях сравнительно небольшие, а интенсивный поток смеси около щупа предотвращает налипание на него смеси. Существуют варианты приборов, в которых автоматически приготовляется образец, уплотняемый с определённым усилием. Однако в приборах, использующих уплотнённые образцы, для определения влажности чаще используется контроль технологических свойств смеси.

Технологические методы контроля влажности

Для определения влажности смеси используется влияние влажности на насыпной вес, формуемость или уплотняемость смеси. Вода активизирует в смеси связующее (глину, бентонит), что и является главной причиной её влияния на технологические свойства. Поэтому *соотношение вода/связующее В/С* (или *вода/глина В/Г*) является важной характеристикой смеси.

С увеличением степени увлажнения (увеличением соотношения *В/С*) связь между зёрнами смеси увеличивается, вследствие этого уменьшаются насыпная масса смеси и формуемость; увеличивается уплотняемость.

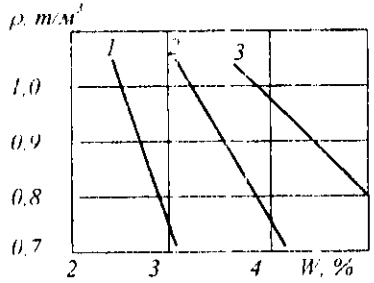


Рис. 3.26

На рис. 3.26 показана зависимость насыпной массы формовочной смеси от влажности при разном количестве мелких частиц: *1* – 8%, *2* – 11%, *3* – 15% (справедливо предположить, что в остальном состав смеси тот же).

На рис. 3.27 показаны зависимости предела прочности $\delta_{сж}$ и газопроницаемости *Г* стандартных образцов во влажном состоянии от соотношения *В/Г*.

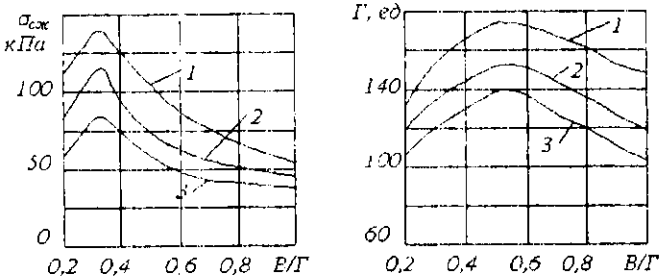


Рис. 3.27

Возможность использования контроля технологических свойств для определения влажности смеси зависит от того, может ли приниматься содержание и свойства других компонентов смеси (помимо влаги): связующего, мелких частиц и др. – постоянным в течение некоторого периода использования смеси.

Содержание влаги за один оборот смеси изменяется от нормы (3 – 5%, в зависимости от типа смеси) до минимума (0–2%) при нормальной эксплуатации смеси, то есть при изготовлении из неё формы и заливки последней.

Количество других компонентов смеси (кроме влаги) изменяется в процессе эксплуатации смеси гораздо медленнее. Основные изменения в её состав вносит заливка форм. При заливке в слоях формы, прилегающих к полости отливки, разрушается связующее, выгорают углеродосодержащие компоненты, измельчается кварцевая основа, увеличивается количество мелких частиц, зёрна песка оолитизируются. Но эти изменения происходят только в сравнительно тонком слое, прилегающем к полости отливки. При хорошем перемешивании оборотной смеси даже в объёме одной формы (это достигается обычно установкой в линии подготовки смеси гомогенизаторов или установок для охлаждения и предварительного смешивания) количество этих компонентов в потоке смеси за один оборот изменяется незначительно. Это и позволяет использовать для контроля влажности смеси её технологические свойства.

На рис. 3.28 показан автоматический *датчик формуемости* – одно из первых устройств для автоматического контроля свойств смеси. Датчик состоит из корпуса *1* с желобами *2*, *3* и *4*, установленного на упругих стойках, электровибратора *5*, который вызывает вибрацию корпуса *1*, двух измерительных блоков, состоящих каждый из фотоэлемента *6* и осветителя *7*, и питателя, представляющего собой шнек *8* с электродвигателем *9*. Все устройство монтируется рядом с чашей смесителя *10*.

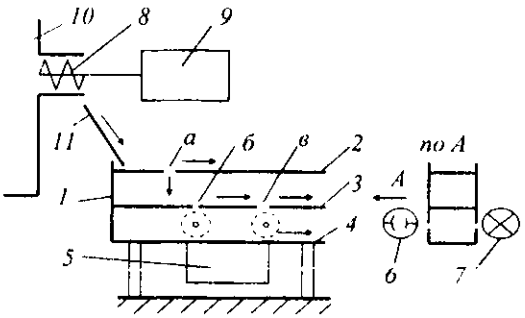


Рис. 3.28

При работе смесителя часть смеси попадает на шнек и при его вращении по склизу *11* подается на верхний желоб *2* корпуса *1*. Вследствие вибрации корпуса смесь движется по желобу слева направо. Часть смеси с верхнего желоба через поперечную щель *а* попадает на средний желоб *3*. Этот желоб имеет две поперечные щели: узкую (6 мм) *б* и широкую (12 мм) *в*. Сухая смесь (с высокой формуемостью) просыпается

через узкую щель. Очень влажная смесь (с низкой формуемостью) почти не просыпается даже через широкую щель. Смесь средней влажности через широкую щель просыпается, а через узкую – нет. Просыпание смеси через эти щели фиксируется фотоэлементами. Если смесь через щель проходит, соответствующий фотоэлемент не освещен и ток через него не проходит, и наоборот. Таким образом, датчик формуемости является датчиком с дискретным выходным сигналом, фиксирующим три уровня формуемости (влажности) смеси: низкая, средняя и высокая.

Технологические методы контроля влажности удовлетворительно работают в интервале рабочей влажности смеси (3–5%) и используются на выходе смеси из смесителя. При низкой влажности (меньше 2–2,5%) результаты измерений неоднозначны и имеют большие разбросы. В этих условиях или применяются физические методы контроля, или производится предварительное частичное увлажнение смеси.

В автоматических установках влажность готовой (или предварительно частично увлажнённой) смеси часто определяется по её уплотняемости (способ описан ниже). Обычно он воспроизводит лабораторную методику. Смесь свободно засыпается в гильзу высотой 100 мм и диаметром 50 мм и после удаления излишка уплотняется пневмоцилиндром, воздействующим на смесь с давлением 1 МПа. Затем фиксируется изменение высоты образца.

На рис. 3.29 показан несколько изменённый метод контроля уплотняемости смеси.

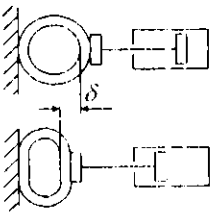


Рис. 3.29

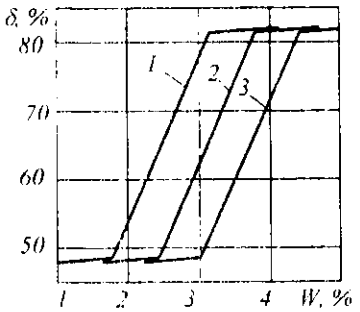


Рис. 3.30

В этом приборе смесь засыпается в эластичное резиновое кольцо диаметром 100 мм и высотой 20 мм и сжимается с постоянным усилием. Деформация смеси δ (уплотняемость) определяется по перемещению штока испытательного цилиндра. Чтобы смесь не выпу-

чивалась при деформации, над кольцом устанавливается крышка из стального листа.

На рис. 3.30 показаны результаты определения деформации смеси, полученные на этом приборе. Кривые *1, 2* и *3* соответствуют глиносодержанию в 10, 12 и 14 %, которое определялось по отмучиванию фракций с размером частиц менее 22 мкм.

По этим графикам видно, что в достаточно большом диапазоне значений влажности в зоне оптимальной влажности величина деформации позволяет определить влажность смеси, если известно глиносодержание смеси.

В областях очень низкой и очень высокой влажности определить влажность по этим графикам затруднительно. Однако надо учесть, что при приготовлении смеси часто используется следующий приём. На стадии предварительной подготовки смеси или в начале смешивания в смесь вводят основную – до 70% – часть воды и производят перемешивание. Такое раннее увлажнение смеси ускоряет набухание бентонита и образование плёнки связующего на зёрнах песка, повышая тем самым эффективность использования связующего. При таком частичном увлажнении смеси точка на графике, характеризующая состояние смеси ($\delta - W$), переходит на среднюю часть графика, на которой определить влажность по величине уплотняемости достаточно просто.

Автоматический контроль свойств смеси

Прибор для контроля технологических свойств смеси обычно устанавливается на выходе из смесителя и размещается над ленточным транспортёром, принимающим из него смесь. Он представляет собой стол или платформу, установленную на стойках над ленточным транспортёром, и может состоять из одной или нескольких позиций, на которых изготавливается образец и определяются различные свойства смеси.

На рис. 3.31 показаны отдельные узлы таких приборов, которые в разных комбинациях, в зависимости от набора (состава) контролируемых свойств, могут присутствовать в данных приборах. На рис. 3.31,а представлен узел для изготовления образца. На столе прибора *1* установлена гильза для образца *2*. Дно гильзы закрыто поршнем *3*, приводимым в действие нижним цилиндром *4*. Гильза заполняется смесью из ковша *5*, который для зачерпывания смеси с ленточного транспортёра опускается своим приводом *6* вниз к транспортёру, а после наполнения смесью поднимается к столу прибора и заполняет

гильзу смесью. Смесь в гильзе разравнивается цилиндром *7*, а её излишек сбрасывается.

На рис. 3.31,б показано определение уплотняемости смеси. Верхний срез гильзы закрывается крышкой *8*, а поршень *3* толкается нижним цилиндром *4* вверх, оказывая на смесь давление 1 МПа. Ход поршня *3* измеряется и служит характеристикой уплотняемости смеси.

Затем в приборе определяется твёрдость образца (рис. 3.31,в), или прочность на срез (рис. 3.31,г), в зависимости от принятого варианта контроля.

Для определения твёрдости образца (рис. 3.31,в) над открытым верхним срезом гильзы размещается измерительный цилиндр *9* с измерительным наконечником *10*. Последний подводится к верхней плоскости образца, и по глубине погружения наконечника в смесь определяется твёрдость смеси в образце.

Для измерения прочности образца при срезе (рис. 3.31,г) нижний цилиндр *4* выталкивает часть образца из гильзы вверх. Затем испытательный цилиндр *11* горизонтальным ходом своего поршня с полукруглой головкой *12* производит разрушение образца. Максимальное усилие на штоке цилиндра служит мерой прочности смеси на срез.

Для определения прочности смеси при сжатии (рис. 3.31,д) над образцом помещается измерительный цилиндр *13*. При ходе его штока вниз измеряется максимальное усилие, достигнутое при разрушении образца, которое и является мерой прочности образца на сжатие.

В установках, определяющих прочность смеси при сжатии и срезе, эти испытания производят на разных образцах.

Усилия, которые измерительные цилиндры оказывают на смесь при её испытаниях на уплотнение, срез и сжатие, обычно определяются силоизмерительными датчиками, установленными на штоках этих цилиндров.

Установки различных производителей имеют некоторые отличия. Так, смесь с транспортера может подаваться ковшом прямолинейным движением (как на рис. 3.31) или с поворотным устройством. Сама установка может быть однопозиционной (все операции со смесью выполняются на одной позиции, а различные измерительные устройства поочередно устанавливаться над ней) или многопозиционной.

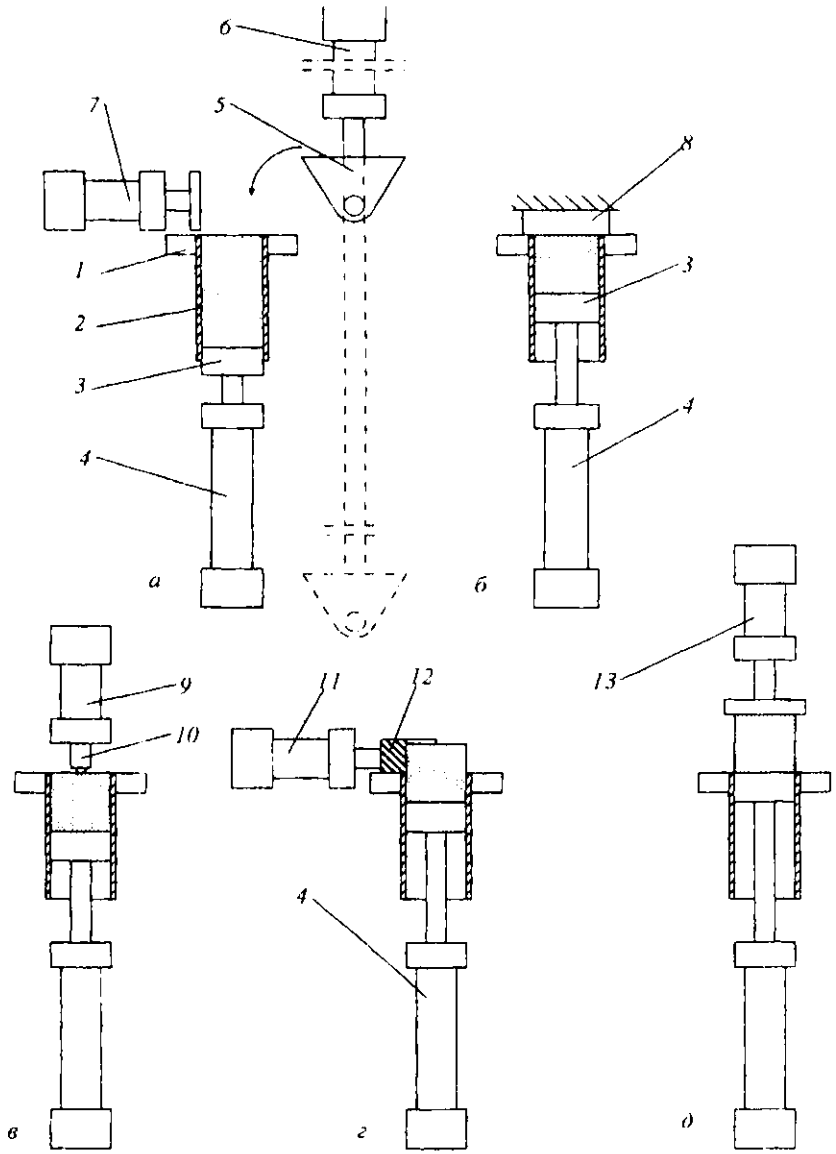


Рис. 3.31

В последнем случае гильза с образцом от позиции к позиции может перемещаться транспортным устройством карусельного или челночного типа. Можно совершить несколько перемещений в одном направлении (например, движения нижнего цилиндра *4* при определении уплотняемости, прочности образца на срез и на сжатие), используя упоры для фиксации промежуточных положений или отдельные цилиндры для этих перемещений.

§4. Измерение температуры

Температура измеряется *контактными* и *бесконтактными* способами.

Средство измерения температуры, предназначенное для выработки сигнала в форме, удобной для восприятия наблюдателем, автоматической обработки, передачи и использования в автоматических системах управления, называется *термометром*.

Средство измерения температуры по тепловому электромагнитному излучению называется *пирометром*. Пирометры применяются для *бесконтактного* измерения температуры.

Контактные способы измерения

Для измерения контактными способами применяются термометры *расширения, сопротивления и термоэлектрические (термопары)*.

Для измерения сравнительно невысоких температур (до 600°С) могут применяться жидкостные стеклянные *термометры расширения*. Они могут иметь встроенный регулируемый электрический контакт, который замыкается при достижении заданной температуры. *Манометрические* термометры расширения, определяющие температуру до 1000°С, имеют невысокую точность, но допускаются к применению в пожаро- и взрывоопасных условиях любых категорий.

Температурные реле основаны на расширении металлического стержня или изгибе биметаллической пластины при нагреве. Точность этих устройств невысока. Они применяются обычно для позиционного регулирования температуры в лабораторных установках.

Термометры сопротивления основаны на явлении изменения электрического сопротивления материалов при нагреве. Применяются *металлические* (проводниковые) термометры сопротивления и *полупроводниковые (термисторы)*.

Металлические термометры сопротивления изготавливаются из меди и платины, имеющих большие значения температурного коэффициента электрического сопротивления. Платиновые термометры сопротивления очень стабильны, так как платина не окисляется при высокой температуре. Верхний предел измерений у них достигает

1000 °С. Медь при повышенной температуре окисляется, сопротивление медных термометров со временем несколько повышается, применяются они для температур до 200 °С.

Датчик металлического термометра сопротивления представляет собой проволоку или ленту, которая намотана на каркас из стекла, кварца, керамики, слюды или пластмассы. Каркас помещен в защитный чехол. Диаметр чехла или чувствительного элемента 6–20 мм, длина 50–180 мм, длина погружаемой части 0,1–1 м. Для устранения вредного влияния окружающей среды на провода датчика внутреннее пространство чехла герметизируется. Показатель тепловой инерции зависит от конструкции датчика и находится в пределах 10–120 с.

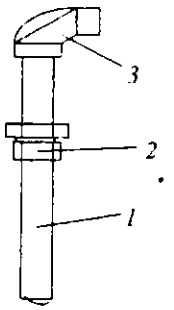


Рис. 3.32

На рис. 3.32 показано конструктивное оформление металлического термометра сопротивления. Обозначено: *1* – защитный чехол, в котором помещается датчик металлического термометра сопротивления, *2* – резьбовой штуцер для закрепления термометра на объекте, *3* – соединительная («клеммная») коробка для подключения термометра к измерительному прибору.

Термисторы представляют собой твердые полупроводники (германий, окислы меди, марганца, титана) с очень большим отрицательным температурным коэффициентом сопротивления (по абсолютной величине на порядок выше, чем у металлов), то есть их сопротивление при нагреве резко снижается. Постоянная времени термисторов, несмотря на их весьма малые размеры, может оказаться весьма значительной (от 1 до 200 с). Термисторы применяются при температурах до 600°С. Использование термисторов позволяет изготавливать очень малые по размерам чувствительные элементы. Полупроводниковые терморезисторы широко применяются в системах температурной сигнализации.

Термоэлектрические датчики (термоэлементы, термопары) основаны на физическом явлении зависимости контактной разности потенциалов (между двумя разнородными металлами) от температуры. В первом приближении термоЭДС является линейной функцией разности температур $\Delta t=t_1-t_2$, где t_1 и t_2 – температуры горячего и холодного спаев термопары. Величина термоЭДС при разности температур в 100°С имеет порядок нескольких милливольт.

В настоящее время стандартизированы следующие типы термоэлектрических термометров (табл. 3.2):

Таблица 3.2

Тип термопары термоэлектрического термометра	Обозначение по ГОСТ (ISO)	Рабочий диапазон длительного режима работы, °С	Максимальная температура кратковременного режима работы, °С
Медь - копелевая	МК (М)	– 200…+100	
Хромель - копелевая	ХК (L)	– 50…+600	800
Хромель - алюмелевая	ХА (К)	–200…+1000	1300
Платинородий (10% родия) - платиновая	ПП (S)	0…+1300	1600
Платинородий (30% родия) – платинородиевая (6% родия)	ПР 30/6 (В)	–300…+1600	1800
Вольфрамрений (5% рения) – вольфрамрениевая (20% рения)	ВР 5/20 – 1 (А)	0…+2200	2500

Кроме того, существуют термопары медь - копелевые, медь - медноникелевые типа Т и близкие к ним медь - константановые (рабочий диапазон 200…+ 400 °С); железо - медноникелевые и близкие к ним железо-константановые типа J (рабочий диапазон 200…+ 700 °С).

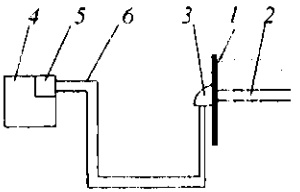


Рис. 3.33

На рис. 3.33 показана схема измерения температуры с термоэлектрическим датчиком. Обозначено: *1* – корпус устройства, в котором измеряется температура, *2* – защитный кожух термопары, в котором помещены электроды термопары с «горячим» спаем, *3* – клеммная коробка для подключения термопары к измерительному прибору, *4* – измерительный прибор; *5* – узел стабилизации температуры холодного спая (встроен в прибор), *6* – компенсационные провода. Их необходимость объясняется следующим.

Температуры соединительных проводов на клеммных колодках термопары и в измерительном приборе различны. При соединении на колодках проводов из разных материалов возникнут паразитные термоЭДС, снижающие точность измерений. Поэтому термопару с прибором соединяют проводами, изготовленными из того же материала, что и термопара, или такими, у которых при температуре до 150°С (заведомо выше максимально допустимой температуры клеммной коробки термопары при работе по требованиям безопасно-

сти) в контакте с термопарой появляется незначительная термоЭДС. Термопары типа ПР 30/6 при 150°С развивают незначительную термоЭДС, поэтому компенсационные провода для них не требуются.

Все термопары из неблагородных металлов хорошо стоят (работают) в инертной и восстановительной атмосфере. В окислительной атмосфере их срок службы ограничен. Термопары типа ПП и ПР сохраняют свою стабильность в окислительной и нейтральной средах, в восстановительной атмосфере они работать не могут. Неблагоприятно воздействует на термопары типа ПП контакт с углеродом, парами металлов, водородом, серой, соединениями углерода и кремния.

Термопары должны быть защищены от механических повреждений, химического загрязнения и электрических помех. Обычно термопара помещается в защитный кожух (чехол) в виде трубки, изготовленной из металла или керамики (диборид циркония, дисилицид молибдена и др.), хотя это увеличивает инерционность термопары. Металлические чехлы обеспечивают защиту от окисления. Однако в присутствии печных газов такой защиты может быть недостаточно. Иногда применяют два чехла, например внутреннюю трубку из плавленого кварца для защиты от газов и наружную трубку из металла, карбида кремния или керамики для защиты от механических повреждений, тепловых ударов и окисления.

Термопары, предназначенные для измерения температуры жидкого металла, называются термопарами погружения. В таких термопарах для кратковременных измерений применяют кварцевые чехлы, для длительных – чехлы из окисной керамики, графита, карбида кремния и др. Механическая прочность чехлов из неметаллических материалов невысока, и термопары часто выходят из строя вследствие их разрушения.

Постоянная времени термопар погружения равна 30–40 с, время чистого запаздывания – до 10 с.

Бесконтактные способы измерения

Пирометры. Принцип действия пирометров излучения основан на зависимости параметров излучения от температуры измеряемого тела или среды.

К тепловому (инфракрасному) излучению относят электромагнитные колебания с длиной волны $\lambda = 0{,}8–80$ мкм, так как именно эти лучи оказывают основное тепловое воздействие (видимая красная часть спектра лежит в пределах $\lambda = 0{,}4–0{,}8$ мкм).

По принципу действия пирометры излучения подразделяются на квазимонохроматические (яркостные), спектрального отношения (цветовые), полного излучения (радиационные) и частичного излучения.

Излучение реальных тел зависит от их температуры, длины волны (на которой измеряется температура) и состояния поверхности этих тел. Поэтому при измерении температуры реальных тел пирометры излучения дают значение условной или псевдотемпературы (яркостной, цветовой или радиационной температуры).

Пирометры различаются также по типу приёмника излучения. Например, в фотоэлектрических пирометрах тепловая энергия измеряется фотоэлементами, фототранзисторами, фотодиодами, фотоумножителями и т. д., в термоэлектрических она измеряется термопарами, термобатареями (из нескольких последовательно включённых термопар).

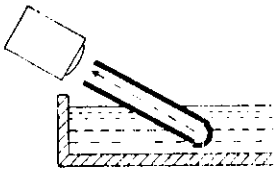


Рис. 3.34

Пирометры излучения могут применяться для измерения температуры твёрдых и жидких тел, которые имеют непрерывные спектры излучения. Газы и пары имеют линейчатые или полосовые спектры. Для измерения их температуры используют огнеупорные «чёрные» трубки (рис. 3.34), которые помещают в измеряемую среду. Пирометр визируется на дно этой трубки и измеряет его температуру, а следовательно, и температуру окружающей среды.

Пирометр изготавливается в виде ручного или стационарно устанавливаемого прибора, состоящего из оптической системы, чувствительного элемента, воспринимающего излучение, и измерительной схемы. Прибор визируется на излучающую поверхность: внутреннюю стенку печи или нагреваемые в ней изделия, поверхность или струю жидкого металла.

Тепловое излучение направляется на датчик оптической системой. Стеклянные элементы системы частично поглощают излучение и ограничивают спектральный диапазон термоэлемента. Для уменьшения поглощения в оптической системе могут использоваться тонкие стекла из кварца, стекла из других материалов, прозрачных для инфракрасного и ультрафиолетового излучения. Для выделения в световом потоке какой-либо части спектра (в пределе – излучения с одной определённой длиной волны) применяются светофильтры.

На результаты измерения пирометрами излучения влияют:

- изменение коэффициента излучения измеряемого тела;

• состояние промежуточной среды, находящейся между объектом измерения и пирометром.

Коэффициент излучения одного и того же тела в зависимости от состояния поверхности может различаться в 2–3 раза. В табл. 3.3 показано изменение этого коэффициента (измеренного при λ=0,65 мкм) при разных состояниях поверхностей некоторых материалов.

Таблица 3.3

Материал	Температура, °С	Коэффициент излучения
Жидкий чугун (поверхность покрыта окислами)	1100–1300	0,9–0,95
Жидкий чугун (поверхность свободна от окислов)	Выше 1375	0,4
Жидкие шлаки		0,65
Сталь неокисленная жидкая		0,37–0,4
Сталь окисленная	800	0,98
Сталь окисленная	1000	0,95
Сталь окисленная	1200	0,92

Погрешность, вызываемая изменением коэффициента излучения, очень велика у радиационных пирометров (может достигать сотен градусов) и минимальна для пирометров спектрального отношения (достигает десятков градусов).

Объекты, находящиеся в среде между измеряемым телом и пирометром (пыль, дым, пары), частично поглощают излучение и тем самым ослабляют излучение, проходящее через эту среду. Так, существенное влияние на показания пирометров полного излучения (радиационных) оказывают пары воды и CO_2, так как в области пропускания стеклянной и кварцевой оптики находится несколько полос поглощения спектров этих веществ.

Современные *квазимонохроматические* пирометры обычно работают в инфракрасном спектре. Отсюда и название – *инфракрасные пирометры*. Они измеряют энергию излучения одной волны в инфракрасном спектре, используя для этого силиконовые или тонкопленочные детекторы (датчики). Современные монохроматические пирометры работают на длине волны, лежащей в пределах 0,65–8,8 мкм. Их недостатки – чувствительность к загрязненности окружающей среды, что ограничивает их применение в *запыленных, задымленных или влажных средах*. На их показания также могут влиять *сильные электромагнитные поля*, например при использовании рядом с индукци-

онными печами. Они также могут давать большие ошибки при измерении температуры поверхности объектов, переходящих во время технологического процесса *из одного физического состояния в другое*, когда у поверхности изменяется показатель черноты, например при разливке металла, когда материал переходит *из жидкого состояния в твердое*.

Практически такими же характеристиками обладают *инфракрасные термопары*. Это квазимонохроматические пирометры, в которых световое излучение преобразуется в сигнал термопары, помещённой в фокус оптической системы и нагреваемой падающими на неё лучами. Инфракрасная термопара не требует сложной электроники для усиления и преобразования сигнала. Их достоинство – это низкая цена и совместимость с измерительной аппаратурой (самописцами, измерителями, регуляторами и пр., имеющими аналоговый вход для термопары, как правило, ХА).

Принцип действия *двухцветных пирометров* основан на измерении *отношения* значений излучаемых *энергий* двух или более волн в разных цветовых спектрах. Рабочий спектральный диапазон у них обычно находится в пределах 0,4–14 мкм (например, 0,4–8 мкм, 0,7–1,1 мкм и т. п.). На рис. 3.35 показан один из вариантов устройства фотоэлектрического пирометра спектрального отношения.

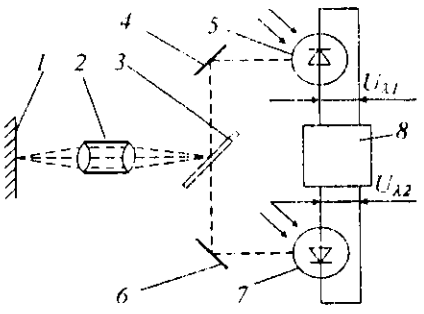


Рис. 3.35

Излучение от измеряемой поверхности *1* поступает в оптическую систему пирометра *2* и затем на фильтр из фосфида индия (полупроводник) *3*, на котором световой поток частично отражается и через зеркало *4* направляется на кремниевый фотоэлемент *5*, на котором под влиянием света возникает фото-ЭДС $U_{\lambda 1}$. Другая часть светового потока частично пропускается фильтром *3* и через зеркало *6* направляется на фотоэлемент *7*, на котором возникает фото-ЭДС $U_{\lambda 2}$. Длина волны отражённого фильтром *3* излучения (в этом приборе) λ_1 = 0,888 мкм, длина волны излучения, прошедшего через фильтр 3, λ_2 = 1,034 мкм. В измерительном блоке *8* измеряется отношение $U_{\lambda 2}/U_{\lambda 1}$, которое про-

порционально отношению соответствующих спектральных яркостей, а последнее определяется цветовой температурой измеряемого тела.

Влияние промежуточной среды на показания пирометров спектрального отношения весьма малы. Исключения составляют случаи, когда спектры поглощения веществ, находящихся в промежуточной среде, совпадают с длинами волн, при которых проводятся измерения. На результаты измерения также влияет пыль с частицами размером меньшим, чем эффективная длина волны.

В современных пирометрах обработка данных, полученных при измерении, выполняется встроенными вычислительными устройствами. При такой обработке возможно внесение различных поправок, уточняющих результат измерения. Иногда пирометры спектрального отношения, выполняющие числовую обработку и внесение уточняющих поправок, называют *пирометрами истинной температуры*.

Существуют и разрабатываются более сложные схемы пирометров спектрального отношения, в которых тепловое излучение разделяется на несколько частей при пропускании через несколько установленных друг за другом полупроводниковых фильтров. Такие приборы выполняют весьма сложную вычислительную обработку данных.

Применение пирометров спектрального отношения и большой вычислительной обработки данных позволяет избежать влияния пыли, дыма, газа и пара в окружающей среде на показания пирометра, а также исключить влияние изменения показателя черноты объекта, например в случае с разливкой металла. Такие пирометры измеряют даже через запыленное стекло экрана в печи.

Оптоволоконные пирометры работают по такому же принципу, как и традиционные инфракрасные пирометры. Разница состоит лишь в том, что световой поток транспортируется к детектору по оптоволоконному кабелю, который может быть изогнут в произвольной форме. Это свойство позволяет проводить измерения в труднодоступных местах или когда измеряемая поверхность находится не в прямом поле зрения. Кроме того, оптоволоконный кабель не подвержен влиянию сильных электромагнитных полей, устойчив к большим давлениям или вакууму.

Максимальная температура эксплуатации оптоволоконного кабеля (световода) в промышленных образцах приборов достигает 130°С.

В настоящее время разрабатываются и испытываются материалы для световодов, работающих при высоких температурах, которые необходимы, например, для непрерывного контроля температуры в металлургических агрегатах.

§ 5. Контроль состава газов

Контроль состава газов (продуктов сгорания топлива, отходящих газов плавильных агрегатов) производится *газоанализаторами*. В системах автоматизации применяют автоматические газоанализаторы.

Современные газоанализаторы являются сложными автоматическими системами, которые помимо определения качественного и количественного состава газа выполняют предварительную подготовку пробы газа (отбор пробы анализируемого газа, охлаждение газа, стабилизацию его давления, механическую очистку от твердых частиц и пыли, химическую очистку от агрессивных компонентов газа).

На рис. 3.36 показана примерная схема подготовки газа. Газ поступает в систему через керамический фильтр *1*, удерживающий мелкие механические частицы. В холодильнике *2* он охлаждается. В сборнике *3* накапливается конденсат, который сливается через кран *4*. Затем газ проходит через камеру осушки *5*, заполненную силикагелем, тканевый или электростатический фильтр *6* для очистки газа от мелкодисперсных частиц, поглотитель химически активных примесей (например, SO_2) *7*, побудитель расхода газа через систему подготовки и газоанализатор (эжектор или электронасос) *8* и поступает в газоанализатор.

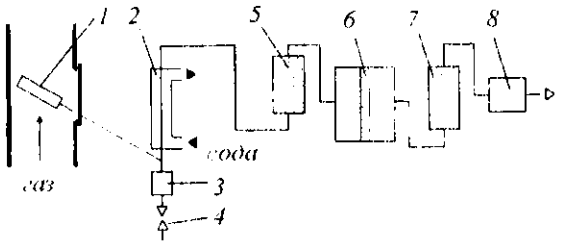


Рис. 3.36

Метод анализа зависит от свойств анализируемого компонента и состава газовой смеси.

Наиболее просто анализировать состав бинарных газов (смесей двух газов) по отличиям их физических свойств. В более сложных смесях для определения количества какой-либо газовой составляющей обычно используется такое физическое свойство, по которому эта составляющая резко отличается от других компонентов газовой смеси. Часто для получения псевдобинарной по свойствам газовой смеси проводится специальная подготовка газа (удаление некоторых компонентов).

Большинство газоанализаторов выпускается для измерения одного или нескольких определённых компонентов газовой смеси. По принципу действия различают *термокондуктометрические, термохимические, магнитные, оптико-акустические* газоанализаторы.

Особое место среди анализаторов занимают *хроматографы* и *масс-спектрометры*. Они позволяют проводить как качественный, так и количественный анализ состава многокомпонентных смесей газов, паров и жидкостей, в том числе измерять и очень малые их концентрации. Масс-спектрометры выпускаются в основном лабораторного типа, а хроматографы – как лабораторного, так и промышленного типа.

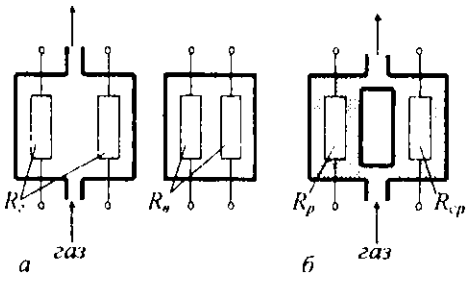


Рис. 3.37

Термокондуктометрические газоанализаторы используют отличие теплопроводности анализируемого компонента от теплопроводности других компонентов. Первичный преобразователь представляет собой две камеры, в которых помещены электрические нагреватели в виде платиновых проводников с сопротивлениями $R_г$ и $R_н$ (рис. 3.37,а). Через одну камеру с сопротивлениями $R_г$ пропускают анализируемый газ, другая заполнена воздухом. Через нагреватели пропускают одинаковый электрический ток, такой, что сопротивление $R_н$ достигает 100 °С. В зависимости от содержания и теплопроводности анализируемого газа $R_г$ нагревается выше или ниже этой температуры, при этом величина сопротивления $R_г$ (зависящая от температуры) изменяется. Возникающая при этом разность сопротивлений $R_г$ и $R_н$ измеряется прибором и служит мерой содержания анализируемого компонента.

Термокондуктометрические газоанализаторы применяются для анализа H_2, CO_2 и ряда других газов.

Термохимические газоанализаторы определяют концентрацию компонента газовой смеси по количеству теплоты, выделившейся при реакции каталитического окисления. Первичный преобразователь газоанализатора представляет собой две камеры (рис. 3.37,б), через которые пропускают анализируемый газ. В камерах помещены терморезисторы: рабочий $R_р$ и сравнительный $R_{ср}$. Рабочий терморезистор находится в насыпном катализаторе, сравнительный – в неактивной мас-

се. При наличии в пропускаемом через камеры газе анализируемого компонента на катализаторе протекает реакция с выделением тепла, температура катализатора повышается, и величина R_p изменяется. По значениям R_p и R_q измерительная система определяет содержание анализируемого компонента.

Такие газоанализаторы применяются для анализа H_2, CO и суммы H_2+CO.

Магнитный газоанализатор обычно применяется для анализа O_2. В нем используется тот факт, что кислород является парамагнитным газом: он втягивается магнитным полем. Другие газы являются либо слабо парамагнитными, либо диамагнитны: они отталкиваются магнитным полем. В магнитных газоанализаторах используется явление термомагнитной конвекции, которое возникает в магнитном поле около нагретого тела, окружённого парамагнитным газом. Движение газа, вызываемое конвекцией, влияет на теплоотдачу нагревательного элемента и изменяет его температуру. Изменение температуры (или соответствующее изменение электрического сопротивления) измеряется измерительной системой.

Для анализа CO и CO_2 применяются *оптико-акустические* газоанализаторы, основанные на зависимости поглощения инфракрасного излучения (в определенном диапазоне волн) от содержания анализируемого газа.

В настоящее время изготавливаются также специализированные комбинированные газоанализаторы, которые предназначены для определения сразу нескольких их компонентов газовой смеси. При этом могут подбираться методы анализа, пригодные для определения нужных компонентов, либо для разных методов анализа могут использоваться одни и те же узлы измерительной системы. Ряд величин можно определить расчётным путем.

Например, один из газоанализаторов дымовых газов измеряет содержание O_2, CO, NO, а также температуру и давление газов. Кроме этого, рассчитывает содержание CO_2 и отношение CO/CO_2.

Контрольные вопросы

1. Как учитывается влияние сопутствующих явлений при измерениях параметров по косвенным показателям в аналоговых и цифровых приборах?

2. Какими средствами контролируется исправность системы ленточных транспортёров?

3. Каков оптимальный метод измерения расхода загрязнённых жидкостей?

4. Какие методы применяются при автоматическом контроле свойств формовочных смесей?

5. Каковы преимущества двухцветных пирометров?

6. Как выполняется подготовка пробы газа перед её поступлением в газоанализатор?

ГЛАВА 4
СРЕДСТВА УПРАВЛЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМ ПРОЦЕССОМ

§1. Исполнительные устройства систем управления

Исполнительные устройства предназначены для преобразования выходного сигнала регулирующего прибора в управляющее воздействие на объект управления. В основном, это различные включения, выключения и переключения, выполняемые средствами дискретной автоматики, или регулирующие воздействия от систем автоматического регулирования.

В качестве регулирующих приборов используются регулирующие блоки, встроенные в измерительные приборы, или специальные регуляторы. В настоящее время функции регулирующего устройства обычно выполняют программируемые контроллеры.

Исполнительные устройства состоят из двух блоков: исполнительного механизма и регулирующего органа.

Регулирующие органы – это устройства, непосредственно воздействующие на объект регулирования для поддержания заданного значения регулируемой величины (или изменения ее по заданному закону). К ним относятся *клапаны* (здесь имеется в виду только конструктивный узел, состоящий из тарелки и седла клапана), *дросселирующие распределители*, *шиберы* и *поворотные заслонки*, *питатели* сыпучих материалов. Регулирующие органы приводятся в движение или удерживаются в определённом положении исполнительными механизмами.

Исполнительные механизмы – это устройства, воздействующие на регулирующие органы. К ним относятся электромеханические преобразователи, электрические и пневматические исполнительные механизмы.

Исполнительные устройства (исполнительный механизм + регулирующий орган) для управления сравнительно небольшими потоками материалов и энергии конструктивно выполняются в виде одного механизма. К таким устройствам относятся регулирующие и запорные клапаны, распределители (работающие в режиме «открыт – закрыт») и дросселирующие распределители, гидравлические усилители мощности.

Для управления большими потоками материалов эти устройства состоят из двух отдельных механизмов: исполнительного механизма (электрического или пневматического) и регулирующего органа (шибера или поворотной заслонки).

Регулирование, как известно, может быть непрерывным и позиционным. При *непрерывном* регулировании регулирующий орган должен иметь непрерывную пропускную характеристику, то есть непрерывную зависимость количества пропускаемого материала от положения регулирующего органа.

При *позиционном* регулировании регулирующий орган может занимать только два или несколько определенных фиксированных положения и быстро перемещаться из одного фиксированного положения в другое. Для такого регулирования могут применяться различные запорные, отсечные и переключающие устройства, более простые по конструкции и более дешевые, чем устройства непрерывного регулирования. Они описаны в главе 1. В литейных установках при сравнительно небольших по величине регулируемых потоках (материалов, энергии и т.п.) целесообразно именно позиционное регулирование.

С точки зрения затрат энергии различают два типа регулирующих органов:

1. Дроссельные регулирующие органы. Они управляют расходом материала путем изменения проходного сечения. К ним относятся регулирующие клапаны, дросселирующие распределители, шиберы, поворотные заслонки.

2. Устройства, регулирующие расход изменением параметров регулируемой среды: налора, давления и др. К таким устройствам относятся приводы с регулируемой частотой вращения, устройства для изменения числа оборотов (например, вариаторы), насосы с регулируемым расходом, гидравлические трансформаторы и преобразователи давления.

Дросселирование является более простым методом. Однако он уступает второму методу по энергетическим затратам: вначале рабочей среде сообщается избыток потенциальной энергии, а затем он расходуется на преодоление сопротивления (гидравлического, электрического и т.п.). Второй тип регулирующих устройств более дорог, но и более экономичен по энергетическим затратам. По мере увеличения мощности регулируемых установок и удорожания энергии ему все чаще отдается предпочтение.

Регуляторы прямого действия являются простейшими по устройству регулирующими устройствами непрерывного действия. Они работают без вспомогательных источников энергии и объединяют обычно в одном корпусе почти все элементы САР – от датчика до регулирующего органа. Такие регуляторы реализуют простейшие алгоритмы регулирования и применяются для управления сравнительно маломощными объектами. Эти регуляторы не обеспечивают высокого

качества регулирования, но имеют низкую стоимость, не требуют посторонних источников энергии. Регуляторы прямого действия применяют для регулирования температуры, давления, расхода и уровня, когда нет необходимости в высокой точности регулирования.

Регуляторы давления прямого действия (редукторы давления) предназначены для понижения сетевого давления до требуемого и его стабилизации в трубопроводе после клапана. Схема такого регулятора показана на рис. 4.1. В корпусе регулятора расположен регулирующий орган (клапан) *1*. Со входа регулятора газ проходит в щель между клапаном и его седлом и через отверстие *а* поступает на выход клапана. Положение клапана определяется мембраной *2*, на которую сверху действует усилие от регулируемой пружины *3*, а снизу – давление газа с выхода регулятора, который попадает в полость под мембраной через отверстие *б*. Усилие от давления на выходе регулятора действует на закрытие клапана. Таким образом, при повышении давления на выходе регулятора клапан закрывается, а при снижении давления – открывается. Величина давления, поддерживаемая регулятором, регулируется изменением сжатия пружины *3* при помощи маховичка *4*.

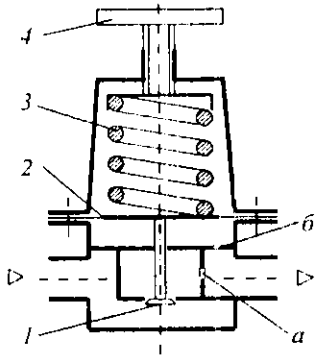


Рис. 4.1

В конструкцию *регулятора температуры* прямого действия входит клапан, который регулирует температуру воздействием на расход охлаждающей (или нагревающей) среды. Чувствительным элементом является термобаллон, наполненной жидкостью с большим коэффициентом объемного расширения. Термобаллон помещается в среду, температура которой регулируется подачей охлаждающей жидкости через регулятор температуры.

В *регуляторах уровня* клапан регулятора перемещается поплавком, служащим датчиком уровня. В остальном устройство регуляторов давления, температуры и уровня идентично.

Электромеханические преобразователи предназначены для преобразования электрического сигнала управления в механическое перемещение ведомого звена, к которому подсоединяются управляющие элементы регулирующих клапанов и дросселирующих распределителей.

Электромеханические преобразователи работают на различных принципах. Наиболее распространены магнитоэлектрические, электромагнитные дифференциальные и поляризованные преобразователи.

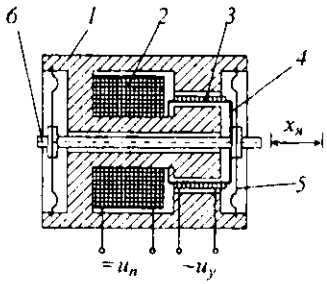


Рис. 4.2

Принцип действия магнитоэлектрического электромеханического преобразователя основан на взаимодействии проводника, по которому проходит ток, с магнитным потоком. Схема одного из распространённых магнитоэлектрических преобразователей приведена на рис. 4.2. Он состоит из статора *1*, обмотки подмагничивания *2* и обмотки управления *3*, размещённой на подвижной катушке *4*. Катушка вместе с обмоткой концентрично размещается в рабочем зазоре статора посредством стержня *6* и центрирующих пружин *5*.

Обмотка подмагничивания *2*, на которую подаётся постоянное напряжение подмагничивания $u_п$, создаёт в зазоре статора магнитное поле. При прохождении через обмотку *3* тока управления на витки этой обмотки будет действовать сила, пропорциональная току управления и активной длине проводника с током. Перемещение $x_я$ катушки с обмоткой управления будет определяться силой, развиваемой током управления и жёсткостью центрирующих пружин *5*.

Регулирующие клапаны применяются для регулирования расхода жидкостей при любых параметрах среды. Эти клапаны приводятся в действие электрическими, пневматическими или гидравлическими исполнительными механизмами. По конструкции клапаны могут быть простыми, когда на тарелку клапана действует усилие от давления регулируемой среды, и двухседельными, разгруженными от этого давления.

На рис. 4.3 показан регулирующий клапан с управлением от пневматического исполнительного механизма. Клапан имеет золотник с двумя тарелками *1* и выполнен так, что его шток разгружен от осевых сил, возникающих в результате давления в корпусе клапана. Клапан регулирует количество жидкости или газа, проходящего через него, изменением проходного сечения между тарелками и седлами клапана.

Пневматический мембранный исполнительный механизм клапана имеет мембрану *2*, закрепленную между двумя дисками *3*, жестко связанными со штоком *4*. Мембрана зажата между крышкой *5* и корпусом *6* механизма. Пружина *7* поджимает мембрану в крайнее верхнее положение. Управляющее давление $p_{ик}$ подается под крышку мембранного механизма.

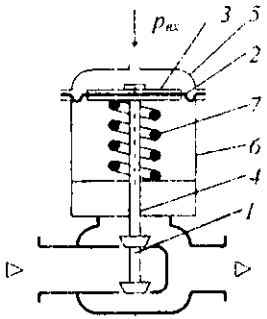


Рис. 4.3

Гидравлические дросселирующие распределители предназначены для плавного регулирования расхода жидкости через них, зависящего от положения входного звена распределителя (в отличие от обычного – переключающего распределителя, имеющего только два предельных положения). В зависимости от типа входного звена они называются распределителями со струйной трубкой, типа «сопло – заслонка», золотниковыми (с плоским или цилиндрическим золотником). По конструкции золотниковые дросселирующие распределители похожи на переключающие распределители (см. рис. 1.2, в), но приводятся в движение устройствами, обеспечивающими остановку золотника в любой точке его траектории. Это может быть электромеханический преобразователь или другой дросселирующий распределитель. Кроме того, для улучшения динамических характеристик золотник (или корпус) имеет некоторые особенности.

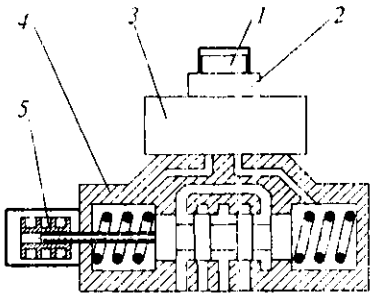


Рис. 4.4

Гидравлический усилитель мощности (гидроусилитель) служит для преобразования сигнала управления (в виде перемещения или усилия) в перемещение ведомого звена гидроусилителя посредством давления жидкости. Он предназначен для управления гидрораспределителями, клапанами, регулируемыми насосами и другими устройствами. Сигналом управления может быть, например, перемещение якоря электромеханического преобразователя.

На рис. 4.4 показана схема трёхкаскадного (трёхступенчатого) гидроусилителя, где *1* – электромеханический преобразователь; *2* – дросселирующий распределитель типа «сопло – заслонка» (первый каскад); *3* – золотниковый дросселирующий распределитель с обратной связью по положению золотника (второй каскад); *4* – дросселирующий распределитель с обратной связью по положению золотника, осуществляемой при помощи дифференциально-трансформаторного датчика *5*. Поскольку информация о положении золотника в этом (третьем) каскаде получается в виде электрического сигнала, в этом гидроусилителе имеется возможность вводить обратную связь программно.

Для управления большими потоками материалов исполнительное устройство состоит из двух отдельных механизмов: исполнительного механизма (электрического или пневматического) и регулирующего органа (шибера или поворотной заслонки).

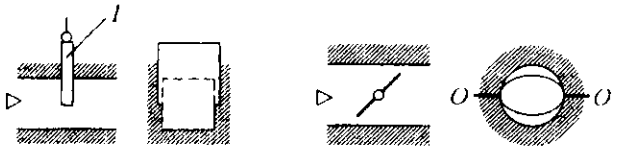


Рис. 4.5

Шибер (рис. 4.5,а) имеет затвор *1* (в виде плоского полотна), который перемещается перпендикулярно направлению потока материала. Шиберы применяются для регулирования расхода газов (при небольших давлениях, до 0,01 МПа) и сыпучих материалов.

Поворотные заслонки (рис. 4.5,б) применяются на трубопроводах для регулирования расхода газов при небольших давлениях. В некоторых случаях они используются для регулирования расхода жидкостей, пара и газов при средних и высоких давлениях, а также для сыпучих материалов.

Регулирование производится вращением заслонки вокруг оси *О–О* заслонки: требуется меньшее усилие для ее поворота по сравнению с усилием для перемещения шибера; выше пропускная способность (меньше гидравлическое сопротивление), чем у клапана.

Для регулирования расхода сыпучих материалов широко применяются различные питатели. Наиболее распространены такие типы питателей: 1) питатели, представляющие собой короткие конвейеры: лен-

точные, пластинчатые, скребковые, винтовые, вибрационные; 2) барабанные: звёздчатые, лопастные; 3) тарельчатые.

Ленточный питатель, используемый в системе дозирования, был показан на рис. 3.19. Ленточные питатели часто применяются в системах дозирования формовочных смесей, вибрационные – для дозирования компонентов формовочных смесей, подачи компонентов шихты и отливок в дозирующие и загрузочные устройства.

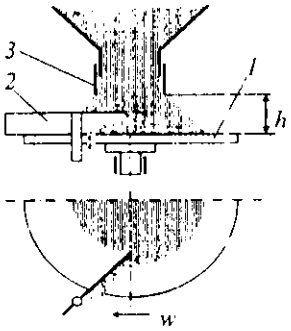


Рис. 4.6

Тарельчатый питатель (рис. 4.6) устанавливается под бункерами большой ёмкости. Он представляет собой диск («тарелку») *1*, вращающийся вокруг вертикальной оси. Из выпускного отверстия бункера материал высыпается на этот диск и снимается с него скребком *2*. Расход материала регулируется установкой скребка, а также установкой манжеты (телескопической муфты) *3* на размер *h*.

Для позиционного регулирования в качестве регулирующих органов применяют различные запорные и переключающие (включающие) устройства. Так, для позиционного регулирования при электрическом нагреве применяются контакторы и реле, при регулировании расхода жидкостей и газов – распределители и запорные клапаны.

Исполнительные механизмы служат для перемещения регулирующих органов. В качестве электрических исполнительных механизмов применяются электродвигатели постоянного или переменного тока, а также шаговые электродвигатели. Шаговые электродвигатели характеризуются тем, что входной сигнал к ним подается в виде отдельных импульсов, и при каждом импульсе вал двигателя поворачивается на строго определенный угол. Этим достигается высокая точность отработки регулирующего воздействия.

Обычно *комплексные исполнительные механизмы* включают в себя электродвигатель, редуктор и рычажную или реечную передачу к регулирующему органу. Кроме того, они имеют датчики конечных положений механизма, устройства для контроля текущего положения регулирующего органа и некоторые дополнительные устройства.

§ 2. Вычислительная техника управления

В последние десятилетия в системах управления широко применяется вычислительная техника. Это объясняется гигантским расширением ее возможностей, а также снижением относительной стоимости. Использование в управлении вычислительной техники коренным образом преобразовало и всю измерительную технику. Для обработки сигналов служат микросхемы, которые позволяют обрабатывать сигналы непосредственно в измерительном приборе. Большинство приборов стало выпускаться с числовым выходом, что значительно упростило сопряжение таких приборов с компьютерами. Появились универсальные приборы, предназначенные для измерения нескольких параметров, например температуры, давления и расхода.

В современном технологическом оборудовании вместо релейно-контакторных и жёстких логических схем используются программируемые контроллеры.

Управляющие вычислительные машины

Первоначально ЭВМ применялись в автоматических системах управления, предназначенных для сложных и быстропротекающих процессов, а также при большом числе каналов управления. В процессе этого развития появились специализированные ЭВМ, которые используются в системах управления.

Управляющими вычислительными машинами (УВМ) стали называть ЭВМ, специально приспособленные для контроля и управления техническими объектами.

В системах управления УВМ реализовали функции управляющего устройства и обеспечивали:

– прием информации от измерительных устройств, местных (локальных) автоматизированных систем, устройств защиты и блокировки, а также других источников информации;

– переработку информации по программе, определяемой заданным алгоритмом управления в реальном масштабе времени;

– выдачу результатов обработки информации оператору, на исполнительные устройства и в другие системы управления.

Такие УВМ применялись для управления автоматическими формовочными линиями, системами подготовки формовочной смеси, плавильными печами и целыми плавильными отделениями, другими технологическими агрегатами.

От обычных ЭВМ управляющие вычислительные машины отличаются наличием *устройств связи с объектом (УСО)*. На рис. 4.7

приведена структура УВМ, где *ПУ* – пульт управления; *Пр* – процессор; *ОП* – оперативная память; *ВП* – внешняя память; *УВв* – устройства ввода-вывода информации (монитор, клавиатура, принтер), *ТМР* – таймер (счетчик времени). В *УСО 1* и *УСО 2* собраны соответственно устройства для ввода информации от объекта управления и для вывода управляющих воздействий на объект.

Назначение и функции таких узлов, как *ПУ*, *Пр*, *ОП*, *ВП*, *УВв*, те же, что и в обычных ЭВМ. Главное отличие УВМ от вычислительных ЭВМ – наличие *УСО* – устройств связи с объектом.

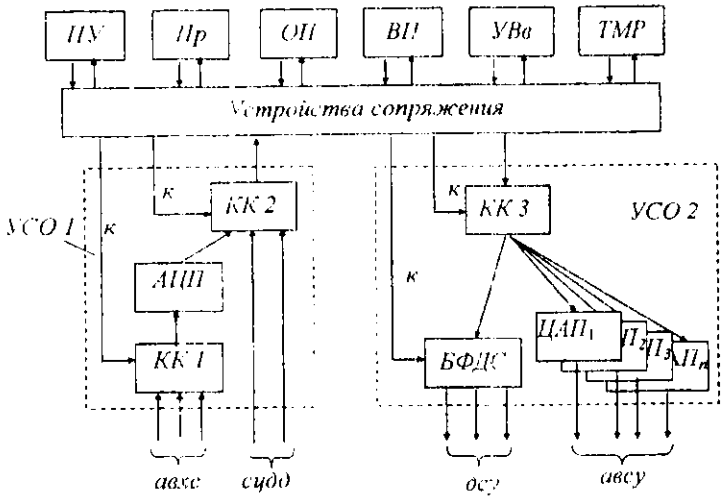


Рис. 4.7

УСО 1 получает от объекта управления сигналы двух видов: аналоговые (*авхс* – аналоговые входные сигналы) и сигналы цифровых и дискретных датчиков (*сддд*). *Аналоговые* сигналы поступают от датчиков с аналоговым выходным сигналом, *цифровые* – от цифровых приборов и других ЭВМ, *дискретные* – от датчиков с дискретными и релейными выходными сигналами. Дискретные и релейные сигналы являются разновидностью цифровых и обрабатываются как цифровые.

Все *входные* аналоговые сигналы, каждый по своей линии связи, поступают на вход коммутатора (переключателя каналов) *КК 1*. По командам, поступающим от процессора *УВМ* по линии связи с *КК 1*, последний подключает на свой выход один из аналоговых датчиков.

сигнал от которого в данный момент требуется передать в *УВМ*. С выхода *КК 1* сигнал поступает в аналого-цифровой преобразователь *АЦП*. Последний преобразует аналоговый сигнал в цифровой. Коммутатор каналов *КК 2* по командам от *УВМ* подключает ко входу *УВМ* один из цифровых или дискретных датчиков.

Сигналы управления, выдаваемые *УВМ* на объект управления, также должны быть двух видов: *дискретные* (*дсу* – дискретные сигналы управления) и *аналоговые* (*авсу* – аналоговые выходные сигналы управления). Пример дискретного сигнала управления – включение контактора электродвигателя, пример аналогового сигнала – значение напряжения, которое должно быть подано на исполнительный механизм регулятора с непрерывным алгоритмом регулирования. При управлении электродвигателем с контактором *УВМ* выдает значение логической переменной (*1* или *0*), которое в *УСО* должно преобразоваться в напряжение, необходимое для включения контактора (или в 0). При управлении исполнительным механизмом системы непрерывного регулирования в *УВМ* будет выработана числовая величина, которая в *УСО* должна преобразоваться в соответствующее значение напряжения или тока.

Дискретные сигналы управления и сигналы двухпозиционного регулирования вырабатываются в *блоке формирования дискретных сигналов управления – БФДС*. К выходам этого блока подключаются катушки контакторов, реле, электромагниты распределителей и т.п. Аналоговые сигналы управления вырабатываются в цифро-аналоговых преобразователях *ЦАП*. Для каждого аналогового сигнала управления необходим свой преобразователь. Коммутатор каналов *КК 3* по командам от *УВМ* подключает к ней тот канал, для которого она в данный момент выдает результат. Поскольку *УВМ* обращается к каждому управляемому устройству периодически, *БФДС* и *ЦАП* должны запоминать и поддерживать выданные *УВМ* значения в промежутки времени между двумя обращениями к одному и тому же каналу.

Связь *УВМ* с *УСО* осуществляется точно так же, как и с другими устройствами ввода-вывода. Каждому устройству присвоен определенный номер (адрес). Свои номера имеют как стандартные устройства ввода-вывода (монитор, клавиатура, принтер), так и устройства, подключенные к *УСО*.

При выполнении программы, когда наступает необходимость получения данных от какого-либо внешнего устройства или получено значение какого-либо управляющего воздействия, выполняется оператор ввода-вывода, который содержит номер устройства, с которого

следует считать информацию (датчика, таймера и др.) или которому следует выдать информацию (*ЦАП*, регулятору, контактору и т.п.).

Таймер весьма часто используется в программах управления. Он может выполнять следующие функции: сообщать текущее время (от заданного начального момента); задавать какие-либо действия ЭВМ в заданные моменты времени; вести учет или ограничивать время решения задачи на ЭВМ и др. Таймер представляет собой устройство, на выходе которого формируется число, пропорциональное времени. Считывая с таймера значения текущего времени, можно решать различные задачи управления, требующие отсчёта временных интервалов.

УВМ должна работать в *реальном масштабе времени*. Под этим понимается тот факт, что результаты работы машины должны своевременно использоваться для целей управления.

Для того чтобы УВМ могла одновременно контролировать или управлять несколькими параметрами, или управлять несколькими механизмами, в ней может быть организован мультипрограммный (многопрограммный) режим работы с учетом приоритетов программ.

Мультипрограммным режимом называется организация одновременного выполнения нескольких программ на одной машине. При организации такого режима выполняется следующее:

1. Устанавливается принцип *приоритетного разделения выполняемых программ*. По этому принципу в каждый данный момент времени выполняется заявка на выполнение той программы, чей *приоритет* наивысший из всех поступивших или выполняемых *заявок* (заявка – это сигнал или требование на выполнение какой-либо программы).

2. В УВМ предусматривается возможность *прерывания* вычислительного процесса. Прерывание – это временное прекращение вычислений по одной программе для выполнения другой программы. Сигналы, вызывающие прерывание, называются запросами прерывания. Запросы на прерывание могут поступать:

– из выполняемой программы;

– от датчиков объекта управления;

- от таймера;

– с пульта оператора.

Работа УВМ в мультипрограммном режиме с приоритетом программ организуется следующим образом.

Если при выполнении какой-либо программы поступила заявка на выполнение программы с более низким приоритетом, то эта заявка ставится в очередь, то есть организуется очередь программ.

Если поступившая заявка имеет более высокий приоритет, то работа с выполняемой программой прерывается, ее результаты запоминаются, и выполняется поступившая заявка. После выполнения заявки с высоким приоритетом следует вернуться к прерванной программе.

Использование УВМ для управления

Способы использования УВМ могут быть различными. Это зависит от наличия необходимых устройств связи с объектом управления, управляющих и регулирующих устройств, предназначенных для работы по командам УВМ, имеющимися вычислительными ресурсами УВМ и их стоимостью. На ранних стадиях использования УВМ сформировались следующие способы их использования: сбор данных и их обработка (*информационный режим*); управление через оператора в режиме разомкнутого контура (*режим советчика*, рис. 4.8,а); *супервизорное управление* (непрямое управление процессом или агрегатом, рис. 4.8,б) в режиме замкнутого контура (в режиме автоматического управления); в режиме *прямого цифрового управления* (рис. 4.8,в).

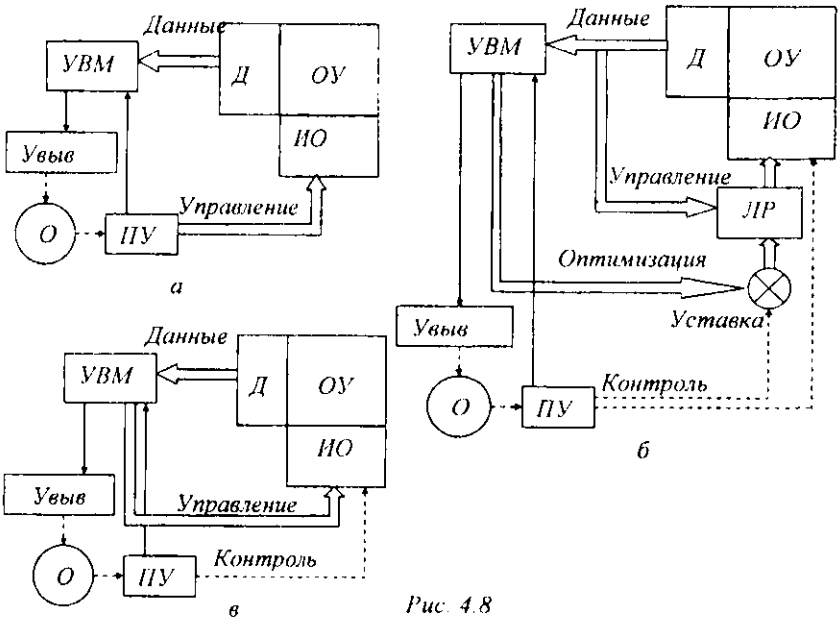


Рис. 4.8

На рис. 4.8 обозначено: *ОУ* – объект управления, *УВМ* – управляющая вычислительная машина, *О* – оператор, *ПУ* – пульт управления,

Д и *ИО* – соответственно датчики и исполнительные органы объекта управления, *ЛР* – локальные регуляторы (обычные регуляторы, регулирующие какой либо параметр), *Увыв* – устройство вывода *УВМ*.

При работе в информационном режиме параметры процесса по каналам ввода поступают в память УВМ. Эти данные обрабатываются по установленным зависимостям и сохраняются для последующего использования. Собранные данные используются, например, для изучения процесса в разных условиях или для построения и уточнения математической модели процесса.

При работе УВМ в режиме советчика оператора (рис. 4.8,а) управляющие воздействия на ОУ осуществляются оператором – технологом *О*, получающим указания от *УВМ*. Последняя функционирует следующим образом. Через заданные промежутки времени (обычно один раз через 5 – 6 мин) переменные процесса поступают с датчиков в *УВМ*, где они обрабатываются и используются в модели управления. После вычисления по алгоритмам, необходимым для приближения процесса к оптимальному режиму, результаты расчёта посредством *Увыв* сообщаются оператору в виде указаний на изменение уставок исполнительных органов *ИО* или регуляторов. Оператор управляет процессом, изменяя уставки регуляторов или выполняя другие действия в соответствии с указаниями УВМ.

В режиме супервизорного управления (рис. 4.8,б) после выполнения в УВМ расчётов по математической модели процесса и определения управляющих воздействий результаты расчётов либо поступают в виде уставок на регуляторы, либо используются для координации работы локальных систем управления. Функции оператора сводятся лишь к наблюдению за ходом технологического процесса и вмешательству при аварийных ситуациях.

При изменении условий выполнения процесса, например при изменении качества сырья или состава выпускаемой продукции, в управляющие программы с клавиатуры вводятся новые коэффициенты уравнений, либо расчёты выполняются на другой ЭВМ, если задача слишком сложна и ресурсов для её решения у УВМ недостаточно.

В режиме прямого цифрового управления (рис. 4.8,в) воздействия на регулирующие и управляющие органы формирует сама УВМ, а локальные регуляторы исключаются из контуров управления (их функции выполняют соответствующие части управляющей программы). Оператор выполняет контрольные функции. Он имеет возможность изменять параметры настройки управляющей программы, корректировать работу УВМ и исполнительных органов объекта.

Пример организации работы УВМ с несколькими программами при управлении технологическим объектом показан на рис. 4.9. Алгоритм разработан для машины литья под давлением. В ходе работы УВМ управляет усилием запирания формы; измеряет и рассчитывает ряд параметров процесса прессования: скорости первой и второй фаз прессования, давление прессования, время и давление подпрессовки; контролирует температуру формы и усилие выталкивания отливки; управляет температурой металла в раздаточной печи.

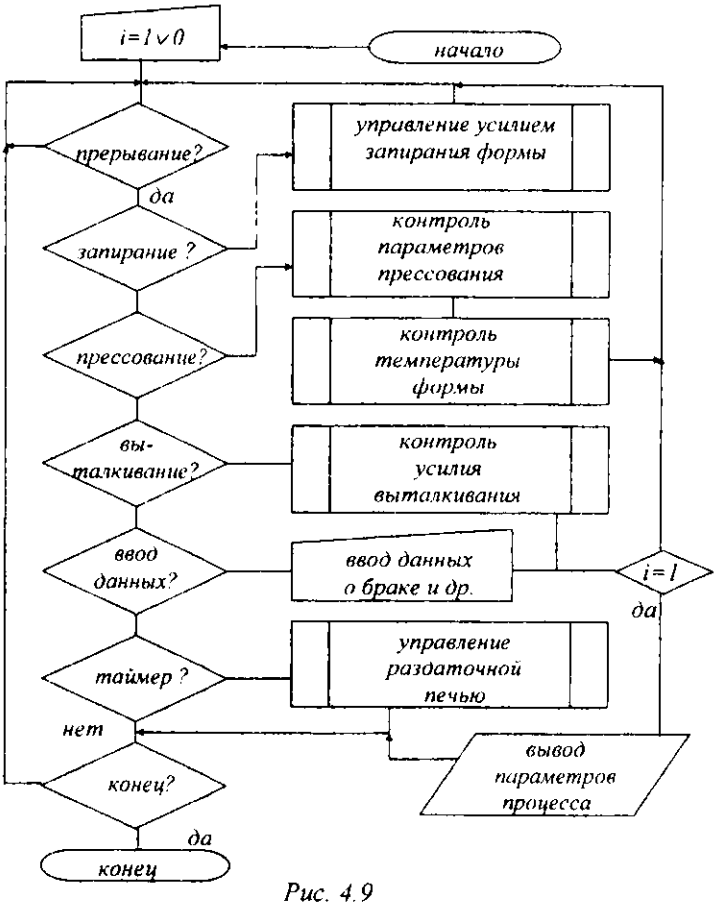


Рис. 4.9

Работа может вестись с выводом или без вывода информации на печать. Предусмотрена возможность ручного ввода с пульта оператора-технолога (ПОТ) в УВМ данных о браке отливок и другой информации.

При чтении этого алгоритма надо помнить, что линии связи, исходящие от какого-либо блока алгоритма вниз или влево, показываются без стрелок, а направленные вверх или вправо – со стрелками.

В начале работы программы для УВМ задается режим работы (вводом соответствующих значений *i*): с выводом информации на монитор или принтер (*i=1*) или без вывода (*i=0*). Затем УВМ ожидает заявки на выполнение одной из подпрограмм управления. Запросы на прерывание могут поступать от кнопок управления или датчиков литейной машины (по началу запирания, прессования или выталкивания отливки), от таймера (для управления температурой металла в печи) или с ПОТ на ввод в УВМ информации о браке. При обнаружении прерывания программа определяет, какое внешнее устройство сделало заявку, и выполняет соответствующую подпрограмму. Под управлением от этой программы машина работает следующим образом. Литейщик нажимает кнопку «Закрывание формы», включая этим соответствующий распределитель (при использовании современных программируемых контроллеров включение распределителя в этот момент и в других случаях также выполняется программно). Нажатие кнопки вызывает прерывание в управляющей программе. Программа определяет, что прерывание вызвано запросом на запирание формы, и запускает подпрограмму управления усилием запирания (эта подпрограмма приведена на рис. 8.33 и описана в главе 8, § 7). При успешном её завершении на пульте зажигается сигнальная лампа, разрешающая заливку. После заливки металла в камеру прессования литейщик нажимает кнопку «Прессование», включая цилиндр прессования. В управляющей программе это вызывает прерывание по началу прессования, и запускается подпрограмма контроля параметров прессования, и так далее. Прерывания на ручной ввод данных с пульта и от таймера на управление раздаточной печью могут иметь более низкий приоритет, чтобы основные этапы рабочего цикла могли успешно закончиться.

На первых шагах в качестве управляющих, как правило, применяли малые ЭВМ (мини- или микроЭВМ, например СМ-1800, СМ-4). Они имели ОЗУ ёмкостью 64–256 Кбайт, быстродействие порядка 230 тыс. операций/с, число портов ввода-вывода 512-4000. Такие машины применялись для сравнительно крупных технологических объектов, например для управления плавильным отделением мощного литейного цеха. Для этих же целей были разработаны комплексы КТС ЛИУС, КТС ЛИУС-2 (комплексы технических средств локальной

информационно-управляющей системы), ДВК, ДВК-2 (дисплейно-вычислительные комплексы).

Логические и регулирующие программируемые контроллеры

Для управления сравнительно небольшими технологическими объектами стали разрабатываться упрощенные вычислительные устройства с ограниченными вычислительными ресурсами. Иногда такие устройства не имеют ряда обычных для ЭВМ периферийных устройств: внешней памяти, дисплеев, принтеров. Часто эти устройства встраиваются в различные станки и машины и выполняют в них функции управляющих устройств (контроллеров). Появился новый тип вычислительных устройств – *программируемый контроллер.*

Программируемым контроллером (ПК) стала называться микроЭВМ с небольшими вычислительными ресурсами и упрощенной системой команд, ориентированная не на вычисления, а на логическое (как правило) управление различным оборудованием.

Программируемый контроллер сам по себе не имеет средств для разработки и отладки программ. Программы для ПК составляются, транслируются и отлаживаются на специальном оборудовании, а затем в готовом виде загружаются в постоянную или оперативную память ПК. Иногда набор программ вводится в постоянное запоминающее устройство ПК на заводе-изготовителе, а при установке ПК на конкретный технологический объект производится только настройка некоторых параметров программы.

При появлении программируемых контроллеров стали выпускаться серии отдельных функциональных блоков, из которых собирались различные конфигурации управляющих устройств. К таким системам относятся, например, программируемые контроллеры Ломиконт, Ремиконт, Микро-ДАТ.

В ранних образцах программируемых контроллеров можно выделить следующие типы.

1. *Программируемые логические микроконтроллеры* – контроллеры, ориентированные на реализацию *алгоритмов логического типа* и предназначенные для использования вместо различных релейных и бесконтактных логических схем электроавтоматики и командоаппаратов.

2. *Программируемые регулирующие микроконтроллеры* – контроллеры, ориентированные на реализацию *алгоритмов автоматического регулирования* аналоговых и аналого-дискретных технологических процессов и предназначенные для использования вместо различных аналоговых и цифровых регуляторов.

Наиболее простые логические ПК предназначались для управления несложными объектами по фиксированной программе. Они имели 16–96 входов-выходов и малую емкость памяти. Более сложные ПК используются для управления достаточно сложными локальными объектами. Они имеют несколько сот входов-выходов, большой объем памяти.

На рис. 4.10 представлено решение одной и той же логической задачи релейно-контакторной схемой и программно на ЭВМ. Ведётся управление контактором *КМ*, включающим некоторый электродвигатель (эта цепь взята из схемы управления загрузкой бункеров на автоматической линии формовки – выбивки). На схеме рис. 4.10,а эта задача решается конечными выключателями SQ1–SQ4. Выводы этих выключателей введены в электрошкаф и там соединены в жёсткую схему. Когда при срабатывании выключателей образуется замкнутая цепь, на контактор подаётся напряжение, он включается и включает двигатель подъёма плужка. В противном случае он разомкнут.

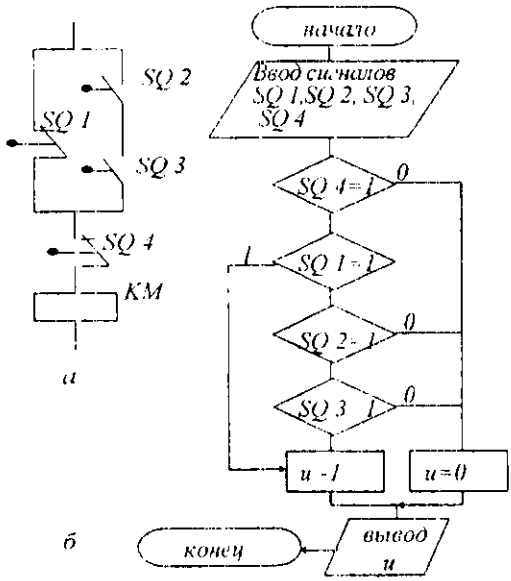


Рис. 4.10

На рис. 4.10,б показано решение той же задачи на ПК. Выводы конечных выключателей подключаются ко входам УСО контроллера. При выполнении данной программы последняя производит опрос *SQ 1–SQ 4* и в зависимости от их состояния (замкнут – разомкнут)

выдаёт в УСО значение управляющего сигнала *и*. Таким образом, программа, показанная на рис. 4.10,б, выполняет функции одной электрической цепи в релейной схеме управления. Управляющая программа обычно состоит из большого количества таких подпрограмм, которые выполняются последовательно одна за другой.

При модернизации систем управления действующего оборудования релейные и жёсткие логические схемы обычно заменяются на программируемые контроллеры. Так, для управления одной автоматической формовочной линией потребовалось 2 программируемых контроллера микро-ДАТ МБ 57, на 128 вводов–выводов каждый. Они заменили около 700 логических элементов бесконтактной жёсткой логики.

Ниже приведена техническая характеристика одного из программируемых контроллеров того времени, предназначенного для управления металлорежущим, кузнечно-прессовым и литейным оборудованием:

Количество каналов ввода – вывода	248
Входные сигналы:	
дискретные, В.....	~110, ~220 – 24,–12
аналоговые, мА....	0–20, ± 20
Выходные сигналы:	
дискретные, В....	~110(2А), – 24(2А)
аналоговые:	
напряжение, В.	0 – 10, ± 10
сила тока, мА....	0 – 20, 4 – 20

Программируемые регулирующие микроконтроллеры применялись вместо нескольких обычных аналоговых или цифровых регуляторов, работающих по ПИ- или ПИД-алгоритму регулирования в системах регулирования (стабилизации) параметров.

Таким контроллером являлся, например, Ремиконд. Этот ПК мог иметь до 64 аналоговых и до 128 релейных входов и выходов.

Библиотека программ Ремиконда компонуется из 20–25 стандартных программ. Они реализуют алгоритмы ПИД-регулирования, интегрирования, дифференцирования, умножения, суммирования, логические операции и т.п. Этот ПК может вести управление по 8–16 каналам (т.е. он эквивалентен 8–16 отдельным регуляторам).

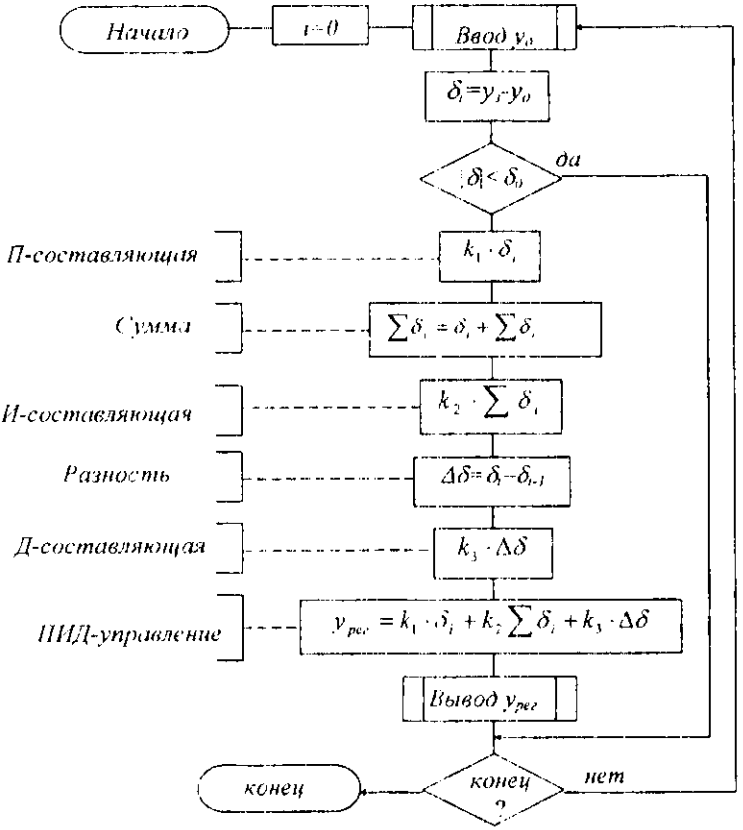


Рис. 4.11

На рис. 4.11 показан алгоритм ПИД-регулирования в программируемом контроллере (без подробностей работы со счётчиком i). С датчика считывается действительное значение регулируемого параметра y_0 и вычисляется рассогласование δ. Если оно меньше допустимого δ_0, то цикл опроса датчика повторяется, или контроллер переходит к другим задачам. В противном случае вычисляются П-, И- и Д-составляющие ПИД-закона регулирования и выдаётся управляющий сигнал на регулирующий орган.

Современные программируемые контроллеры

В настоящее время существуют разные типы ПК, предназначенных для различных целей – от управления технологическими процессами и установками малой сложности и встраиваемых в технологическое оборудование, до мощных вычислительных машин, используемых в составе АСУ ТП для управления сложными производствами. Для примера в табл. 4.1 даны характеристики программируемых контроллеров, выпускаемых российской группой компаний «Текон» («Технологические контроллеры»).

ТКМ 410 – технологический контроллер, предназначенный для построения управляющих и информационных систем автоматизации технологических процессов малого и среднего (по числу входов – выходов) уровня сложности и широким динамическим диапазоном изменения технологических параметров, а также подсистем сложных АСУ.

ТКМ 52 – PC-совместимый программируемый контроллер. Предназначен для сбора и обработки информации, реализации функций контроля, программно-логического управления, регулирования, противоаварийных защит и блокировок, для использования в составе распределенных автономных АСУ ТП.

МФК является многофункциональным PC-совместимым программируемым контроллером, предназначенным для реализации функций контроля, программно-логического управления, многоконтурного регулирования, выполнения сложных алгоритмов управления, требующих большой вычислительной и информационной мощности.

Таблица 4.1

Модель	ТКМ 410	ТКМ 52	МФК
Процессор	ATMEL	586	586
Частота	33 МГц	133 МГц	133 МГц
Дискретные входы	40	до 192	до 768
Дискретные выходы	24	до 160	до 640
Аналоговые входы	16	до 64	до 256
Аналоговые выходы	2	до 32	до 128
ОЗУ	2 Мб	8–32 Мб	16–32 Мб
Флэш память	2 Мб	8–144 Мб	16–144 Мб
Энергонезависимое ОЗУ	512 Кб	128–512 Кб	128–512 Кб

Примечание. Флэш память – ППЗУ (постоянное перепрограммируемое запоминающее устройство).

В состав всех контроллеров входят астрономический таймер – календарь и сторожевой таймер аппаратного сброса Watch Dog для предотвращния «зависания» модулей.

Эти контроллеры снабжены УСО, обеспечивающими их связь с различными типами датчиков и управляющими устройствами (табл. 4.2).

Таблица 4.2

Модули ввода	Модули вывода
Дискретные	*Дискретные*
Дискретные 24–48 В	Механические реле – 220 В, 2А
Дискретные частотно-импульсные	Герконовые реле до 10 Вт
Аналоговые	Твёрдотельные реле до 10 Вт
Унифицированные токовые сигналы 0–5 мА, 0–20 мА, 4–20 мА	Полупроводниковые ключи до 10 Вт
Унифицированные сигналы напряжения 0–10 В	Симисторы – 220 В, 2А
Сигналы термопар по ГОСТ Р 50431–92	*Аналоговые*
Сигналы термопреобразователей сопротивления по ГОСТ Р 50353	Унифицированные токовые сигналы 0–5 мА, 0–20 мА, 4–20 мА
От тензодатчиков	

Программируемые контроллеры, или *промышленные компьютеры* (компьютеры, предназначенные для управления технологическим оборудованием), имеют следующие особенности:

- работа в режиме реального времени (для этих компьютеров разработаны специальные *операционные системы реального времени*);
- конструкция компьютера приспособлена для работы в цеховых условиях (повышенная вибрация, электромагнитные помехи, запылённость, перепады температуры, иногда взрывобезопасность);
- возможность встраивания дополнительных блоков управляющей и регистрирующей аппаратуры;
- автоматический перезапуск компьютера в случае «зависания» программы;
- повышенные требования к надёжности функционирования.

В программном обеспечении программируемых контроллеров используются специальные языки программирования. Основные из них описаны в международном стандарте IEC 61131–3 (IEC – международный электротехнический комитет) «Программируемые контроллеры. Языки программирования».

В этот стандарт включены следующие языки:

SFC – язык последовательных функциональных схем;

FBD – язык функциональных блоковых диаграмм;

LD – язык релейных диаграмм;

ST – язык структурированного текста;

IL – язык инструкций.

Для разработки программы управления для программируемого контроллера существуют специальные программы (например, *ISa GRAF*), которые выполняют эту работу автоматически. Например, при разработке системы дискретной автоматики на языке релейных диаграмм элементы релейной схемы – условия и команды – вводятся в виде символов на графический монитор. Там же указываются разветвления и другие элементы граф–схемы алгоритма управления, то есть на мониторе рисуется граф–схема алгоритма управления.

Программа ISa GRAF даёт возможность пользователю описать автоматизируемый процесс в наиболее лёгкой и понятной форме и не требует специальных знаний по программированию.

Современные системы управления. АСУ ТП

Современные автоматизированные системы управления технологическими процессами (АСУ ТП) обычно имеют два уровня управления. Они часто называются системами промышленной автоматизации. На верхнем *(диспетчерском)* уровне АСУТП (иногда этот уровень представляет собой *АРМ оператора* – автоматизированное рабочее место оператора) обрабатываются данные о состоянии оборудования, о протекании производственного процесса. Эти данные используются для принятия решений по загрузке оборудования и выполнению технологических процессов. Для выполнения диспетчерских функций используется система SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition) – система супервизорного управления и обработки данных. Кроме диспетчерских функций, система SCADA выполняет задачи разработки программного обеспечения для промышленных систем компьютерной автоматизации. Таким образом, система SCADA выполняет следующие функции:

- сбор первичной информации от датчиков;
- хранение, обработка и визуализация данных;
- управление и регистрация аварийных сигналов;
- планирование загрузки оборудования и выполнения технологических процессов;
- расчёт потребления и выработки за час, смену, сутки с накоплением за месяц; расчёт удельных норм;
- обмен информацией с информационной сетью более высокого уровня, например с корпоративной сетью предприятия. Подготовка информации для вышестоящих и смежных систем и уровней управления;

• представление текущей информации оперативному персоналу и другим пользователем;

• автоматизированная разработка прикладного программного обеспечения, например, для программируемых контроллеров.

Техническое обеспечение на диспетчерском уровне обычно представлено персональными компьютерами.

На уровне *управления технологическим оборудованием* (на уровне *контроллеров*) в АСУ ТП выполняется:

• запуск, тестирование, выключение оборудования;

• регулирование отдельных параметров технологического процесса и многосвязное регулирование;

• логическое управление; выполнение логических операций дискретного управления процессом и оборудованием;

• выработка управляющих воздействий для рабочих органов программно управляемого оборудования;

• оптимальное управление технологическим процессом и оборудованием;

• сигнализация состояния параметров технологического процесса и технологического оборудования;

• регистрация параметров технологического процесса и состояния оборудования;

• контроль и регистрация отклонений параметров процесса и состояния оборудования от заданных;

• анализ срабатывания блокировок и защит технологического оборудования;

• сигнализация о неисправностях;

• диагностика и прогнозирование хода технологического процесса и состояния технологического оборудования;

• оперативное отображение информации и рекомендаций ведения технологического процесса и управления технологическим оборудованием;

• расчёт технико-экономических и эксплуатационных показателей технологического процесса и технологического оборудования;

Для этого в составе технологического оборудования используются системы управления на базе программируемых контроллеров – компьютеров, встроенных в технологическое оборудование. Поэтому системы промышленной автоматизации часто называют *встроенными системами* (Embedded Computing Systems).

В зависимости от характера и условий производства распределение функций между верхним и нижним уровнем АСУ ТП может меняться.

В настоящее время для управления сложными объектами большое распространение получили системы, основанные на концепции *SoftPLC*. Роль *программируемого контроллера* в этом случае выполняет PC-совместимый компьютер обычного или индустриального исполнения. Программа выполняется на компьютере, а сбор данных и управление объектом производится с помощью удалённых модулей ввода-вывода. Удалённые модули УСО могут управляться контроллерами.

В литейных цехах существуют АСУ ТП плавки, приготовления смеси, АСУ ТП автоматических линий формовки – выбивки и всей системы получения отливок в песчаных формах.

Сложное оборудование (например, машины ЛПД) также имеют информационное обеспечение на уровне систем АСУ ТП.

Контрольные вопросы

1. В каких случаях применяют регуляторы прямого действия?
2. Как регулируется расход сыпучих материалов?
3. Каково назначение программируемых контроллеров?
4. Назначение устройств связи с объектом.
5. Какие аппараты используются для преобразования выходных сигналов ПК в управляющие воздействия?
6. С какими входными и выходными сигналами работают программируемые контроллеры?

ГЛАВА 5

ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ СХЕМЫ СИСТЕМ АВТОМАТИЗАЦИИ

§1. Назначение и содержание функциональных схем

При проектировании технического объекта разрабатывают функциональную схему системы автоматизации этого объекта.

Функциональные схемы определяют состав и структуру отдельных узлов автоматического контроля, управления и регулирования технологического процесса и оснащение объекта управления приборами и средствами автоматизации.

Объектом управления в системах автоматизации технологических процессов является совокупность основного и вспомогательного оборудования, на котором выполняется технологический процесс, а также потоки энергии, сырья и других материалов, используемых в этом процессе.

При разработке функциональных схем автоматизации технологических процессов решаются следующие основные задачи:

- получение первичной информации о состоянии технологического процесса и оборудования;
- непосредственное воздействие на технологический процесс для управления им;
- стабилизация технологических параметров процесса;
- контроль и регистрация параметров технологического процесса и состояния технологического оборудования.

Решение этих задач основано на анализе условий работы технологического оборудования, выявленных законах и критериях управления объектом, а также на требованиях, предъявляемых к точности стабилизации, контроля и регистрации технологических параметров, к качеству регулирования и надёжности.

Результатом составления функциональных схем автоматизации являются:

- выбор методов измерения технологических параметров;
- выбор основных технических средств автоматизации;
- определение приводов исполнительных механизмов регулирующих и запорных органов технологического оборудования;
- определение способов представления информации о состоянии технологического процесса и оборудования;
- размещение средств автоматизации на щитах, пультах, технологическом оборудовании.

Технологическое оборудование и коммуникации на функциональных схемах изображаются, как правило, упрощенно, без указания отдельных устройств вспомогательного назначения. Однако эта схема должна давать ясное представление о принципе её работы и взаимодействии со средствами автоматизации. В отдельных случаях некоторые элементы технологического оборудования допускается изображать на функциональных схемах в виде прямоугольников с указанием наименования этих элементов или не показывать вообще.

Функциональная схема выполняется в виде чертежа, на котором условными изображениями показывают: технологическое оборудование, коммуникации, органы управления и средства автоматизации с указанием связей между технологическим оборудованием и средствами автоматизации, а также связей между отдельными функциональными блоками и элементами автоматики. Вспомогательные устройства, такие, как автоматы, выключатели и предохранители в цепях питания, редукторы и фильтры для воздуха, на этих схемах не показывают.

Технологические процессы литейного производства реализуются, как правило, на сложном автоматическом оборудовании (формовочных и стержневых автоматах и линиях), имеющем большое количество различных приводов. Такое оборудование имеет свои системы управления и автоматические средства для контроля положения и состояния механизмов, необходимые для автоматического управления их приводами, например для управления цикловой работой этих машин. Эти элементы автоматизации при использовании сложного оборудования чрезмерно перегружают функциональную схему автоматизации технологических процессов. Разработка управления этим оборудованием производится, как правило, отдельно и описывается в специальной документации (например, циклограммами, алгоритмами управления и программами), а информационные связи между системой автоматизации процесса и системой управления такого оборудования лишь указываются на схемах.

В настоящее время для управления процессами часто используется сложная обработка информации, выполняемая вычислительными машинами и устройствами. Описывать такую обработку в схемах автоматизации также нецелесообразно; она представлена в приложениях к схеме автоматизации, содержащих соответствующие алгоритмы и программы, загружаемые в вычислительные устройства.

Некоторые системы работают непрерывно (независимо от других систем) в ходе технологического процесса (например, системы регулирования). Их работа полностью представляется на функциональной схеме. Работа других систем зависит от смежных систем. Напри-

мер, системы управления дозированием запускаются в работу по мере выполнения циклограммы какой-либо машины. Непосредственно из функциональной схемы автоматизации работа таких систем не ясна, поэтому она описывается в сопроводительной документации.

§ 2. Изображение приборов и средств автоматизации на функциональных схемах

ГОСТ 21.404-85 устанавливает условные обозначения приборов, средств автоматизации и линий связи, применяемых при выполнении схем автоматизации технологических процессов, разрабатываемых для строительства предприятий, зданий и сооружений всех отраслей промышленности и народного хозяйства.

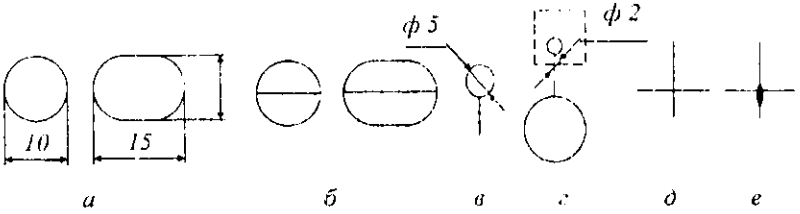


Рис. 5.1

По рис. 5.1,а обозначаются приборы, включая первичные измерительные преобразователи (датчики), устанавливаемые на месте (например, непосредственно на технологическом оборудовании); по рис. 5.1,б – приборы, устанавливаемый на щите; на рис. 5.1,в показан исполнительный механизм; на рис. 5.1,г изображено отборное устройство, если необходимо указать его точное положение внутри технического аппарата; на рис. 5.1,д, е – линии связи и их пересечения (д – пересечение линий связи без соединения; е – соединение линий связи).

Наименование измеряемой величины и функции, выполняемые приборами, обозначают буквами латинского алфавита по таблице 5.1.

Таблица 5.1

Обозначение	Измеряемая величина		Функции, выполняемые прибором		
	Основное обозначение измеряемой величины	Дополнительное обозначение, уточняющее измеряемую величину	Отображение информации	Формирование выходного сигнала	Дополнительное значение
1	*2*	*3*	*4*	*5*	*6*
A	+	–	Сигнализация	–	–
B	+	–	–	–	–
C	+	–	–	Автоматическое регулирование, управление	–
D	Плотность	Разность, перепад	–	–	–
E	Электрическая величина	–	–	–	–
F	Расход	Соотношение, доля, дробь	–	–	–
G	Размер, положение, перемещение	–	–	–	–
H	Ручное воздействие	–	–	–	Верхний предел измеряемой величины
I	+	–	Показание	–	–
J	+	Автоматическое переключение, обегание	–		
K	Время, временная программа	–	–	+	
L	Уровень	–	–	–	Нижний предел измеряемой величины

Продолжение табл. 5.1

1	2	3	4	5	6
M	Влажность	–	–	–	–
N	+	–	–	–	–
O	+	–	–	–	–
P	Давление, вакуум	–	–	–	–
Q	Величина, характеризующая качество: состав, концентрацию и т.п.	Интегрирование, суммирование по времени	–	+	–
R	Радиоактивность	–	Регистрация	–	–
S	Скорость, частота	–	–	Включение, отключение, переключение, сигнализация	–
T	Температура	–	–	+	–
U	Несколько разнородных измеряемых величин	–	–	–	–
V	Вязкость	–	+	–	–
W	Масса	–	–	–	–
X	Нерекомендуемая резервная буква	–	–	–	–
Y	+	–	–	+	–
Z	+	–	–	+	–

Примечание Буквенные обозначения, отмеченные знаком «+», являются резервными, а отмеченные знаком «-», не используются.

Резервные буквы в таблице 5.1 предназначены для обозначения величин, не предусмотренных стандартом.

Обозначение прибора строится следующим образом.

В верхней части окружности (см. рис. 5.1,а, б) помещается буквенное обозначение измеряемой величины; значение, уточняющее значение первой буквы (если требуется); обозначение функционального признака прибора.

В нижней части окружности наносится позиционное (цифровое или буквенно-цифровое) обозначение, указывающее нумерацию комплекта измерения и регулирования и прибора в этом комплекте. Пример обозначения прибора показан на рис. 5.2.

Рис. 5.2

Дополнительные обозначения функциональных признаков приборов приведены в таблице 5.2.

Таблица 5.2

Наименование	Обозначение	Назначение
Чувствительный элемент	*E*	Первичные преобразователи: датчики температуры, сужающие устройства расходомеров и т.д.
Дистанционная передача	*T*	Приборы бесшкальные с дистанционной передачей сигнала
Станция управления	*K*	Приборы, имеющие переключатель для выбора вида управления и устройства для дистанционного управления
Преобразование, вычислительные функции	*Y*	Преобразователи сигналов и вычислительные устройства

Дополнительные обозначения (буквы *E, T, K, Y*) ставятся после основного обозначения.

Справа от условных обозначений преобразователей сигналов и вычислительных устройств может указываться вид преобразования или операции, например $\sum, \int, \frac{dx}{d\tau}$ (суммирование, интегрирование и дифференцирование), *P* – пневматический сигнал, *D* – дискретный сигнал, *P/E* – преобразование пневматического сигнала в электрический и т.п.

§ 3. Функциональные схемы контроля, регулирования и управления

Ниже приведены примеры функциональных схем автоматического контроля, регулирования и управления некоторыми параметрами технологического процесса.

Функциональные схемы автоматического контроля

На рис. 5.3,а показана схема контроля температуры в нагревательном устройстве *1*. В нём установлен датчик температуры *2*, сигнал от которого поступает в прибор для измерения температуры с индикацией показаний *3*.

Контроль ленточного транспортёра представлен на рис. 5.3,б. При обрыве ленты транспортёра *1* реле контроля скорости *2*, установленное на неприводном ролике транспортёра, фиксирует прекращение вращения ролика и включает сигнальную лампу *3*.

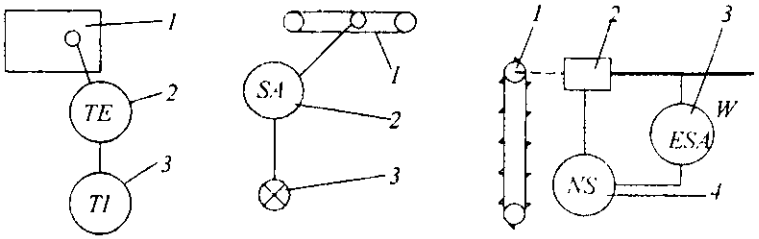


Рис. 5.3

На рис. 5.3,в элеватор *1*, приводимый электродвигателем *2*, контролируется ваттметром *3* с устройством отключения и сигнализации. При перегрузке элеватора ваттметр фиксирует увеличение тока, протекающего через двигатель, отключает контактор двигателя *4* и подаёт аварийный сигнал.

Регулирование давления

Регулирование давления в технологическом объекте обычно осуществляется изменением расхода вещества через аппарат. Это достигается с помощью регулирующего органа, изменяющего гидравлическое сопротивление в линии подачи вещества.

На рис. 5.4,а показано регулирование давления в трубопроводе при помощи *регулятора давления прямого действия* «после себя», то есть в части трубопровода, расположенном по движению потока после регулятора.

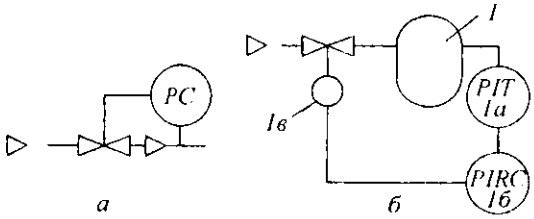


Рис. 5.4

На рис. 5.4,б показана схема САР давления в ресивере *1*. САР состоит из первичного преобразователя давления (манометра) *1а*, совмещенного с промежуточным преобразователем сигнала датчика в унифицированный промежуточный сигнал, измерительного прибора с индикацией и регистрацией показаний и регулирующим устройством *1б*, регулирующего клапана с мембранным исполнительным механизмом *1в*.

Регулирование расхода жидкостей и газов

При транспортировке жидкостей и газов с помощью центробежных насосов и компрессоров регулирование расхода производят с помощью дроссельного регулирующего органа. САР расхода, изображенная на рис. 5.5,а, состоит из первичного преобразователя (сужающего устройства или диафрагмы) *1а*, промежуточного преобразователя перепада давлений в унифицированный пневматический сигнал (дифманометра) *1б*, измерительного регистрирующего прибора с регулирующим устройством *1в* и регулирующего клапана с мембранным исполнительным механизмом *1г*.

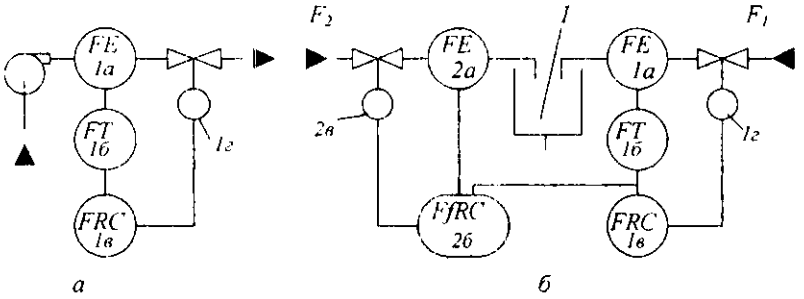


Рис. 5.5

При управлении многими технологическими процессами необходимо стабилизировать заданное *соотношение двух потоков*. На рис. 5.5,б приведена схема САР соотношения двух потоков (F_1 и F_2), поступающих в емкость *1*.

Один из контуров управления, в котором расход потока F_1 стабилизируется с помощью обычной САР (поз. *1а, 1б, 1в, 1г*), принят за основной. Эта САР состоит из первичного преобразователя расхода (например, диафрагмы) *1а*, дифманометра с дистанционной передачей показаний *1б*, измерительного регистрирующего прибора с регулирующим устройством *1в* и регулирующего клапана с мембранным исполнительным механизмом *1г*. С выхода промежуточного преобразователя *1б*, измеряющего расход основного потока, сигнал поступает в регулятор соотношения *2б*, который получает также сигнал от ротаметра *2а*, и воздействует на исполнительный механизм *2в* регулирующего клапана в трубопроводе подачи второго потока F_2.

Регулирование уровня

Существуют САР уровня с точным поддержанием заданного уровня (в этом случае обычно применяют САР с непрерывным регулированием) и САР, обеспечивающие только некоторый запас материала в емкости или бункере, не менее заданной величины. В последнем случае достаточно применить двухпозиционное регулирование. Такая САР показана на рис. 5.6.а.

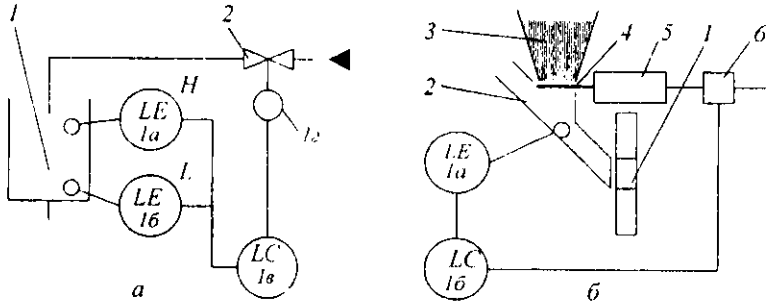


Рис. 5.6

Эта система обеспечивает наличие некоторого запаса жидкости в сосуде *1*. Жидкость в него подаётся через запорный клапан *2*, приводимый исполнительным механизмом (соленоидом) *1г*. Клапан открывается посредством реле уровня *LC* (прибор *1в*) при снижении уровня до минимального значения, контролируемого датчиком нижнего уровня (например, емкостным) *1б*, и закрывается при срабатывании датчика верхнего уровня *1а*.

На рис. 5.6,б показано управление устройством для пополнения системы оборота дроби в дробемётном барабане. Дробь для дробемётного аппарата *1* подаётся по жёлобу *2*. Дополнительный запас дроби хранится в бункере *3*, закрываемом шибером *4*. Если дроби в системе недостаточно и на жёлобе перед аппаратом её нет (что фиксируется датчиком уровня дроби *1а*), реле уровня *1б* открывает шибер при помощи пневмоцилиндра *5* и распределителя *6*.

Дозирование

На рис. 5.7,а изображена функциональная схема дозирования жидкости при помощи плунжерного насоса (без контроля полученной дозы). Насос *1* приводится пневмоцилиндром *2* с распределителем *3*. При возвратно поступательных ходах штока цилиндра (и соответственно плунжера насоса) жидкость с помощью обратных клапанов *4* перекачи-

вается из трубопровода *5* в трубопровод *6*. Величина дозы определяется числом ходов плунжера. Управление пневмоцилиндром осуществляется командным электрическим прибором *KS*, который выдаёт управляющие сигналы (включение и выключение соленоида распределителя *3*) через заданные промежутки времени до тех пор, пока реле счёта импульсов *EC* не подаст сигнал *«1»* на прекращение работы *KS* (при достижении числа ходов *n*, установленного на задатчике *H*).

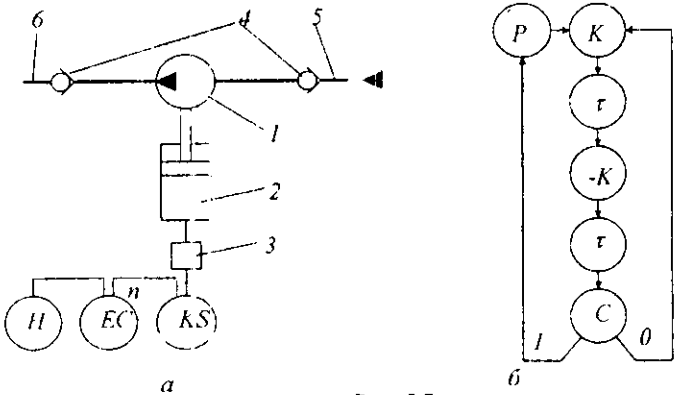


Рис 5.7

Из функциональной схемы не вполне ясен сам процесс дозирования. Для пояснения работы показываемых в функциональной схеме устройств последняя должна содержать пояснения, которые обычно содержатся в приложениях к функциональной схеме. Здесь необходимое пояснение даётся граф-схемой алгоритма управления дозированием (рис. 5.7,б). Обозначено: *P* – команда на дозирование, *K* и *-K* – команды на включение и выключение соленоида, *τ* – время, отводимое на движение поршня пневмоцилиндра, *C* – команда от *EC* (при прекращении дозирования *C* = *1*). В настоящее время для такого управления обычно используются программируемые контроллеры, одна из программ которого реализует алгоритм, изображенный на рис. 5.7,б. Контроллер выполняет также функции задатчика и реле *EC*.

Система автоматизации сушила

Система автоматизации сушила обычно состоит из нескольких систем автоматического контроля, сигнализации и регулирования. Она может быть составлена из отдельных приборов (рис. 5.8,а) или может использовать программируемый контроллер.

Любое нагревательное устройство, использующее газ, оборудуется системой взрывобезопасности, которая отсекает подачу газа при аварийном падении давления газа или воздуха. На рис. 5.8 для этого служит сигнализатор падения давления *1а*, который измеряет давление газа и воздуха и при снижении того или другого выключает отсечной клапан *1б* и включает сигнальную лампу *1в*.

САР процесса горения изменяет расход воздуха пропорционально расходу газа, обеспечивая заданный коэффициент избытка воздуха. Это необходимо для экономичного сжигания топлива и получения требуемой степени разбавления продуктов сгорания. Система состоит из измерительных диафрагм на топливо- и воздухопроводах *2а*, *2б*; дифманометров *2в*, *2г*; измерительных приборов с регистрацией показаний *2д*, *2е*; регулятора соотношения *2ж*, задатчика *2з*, исполнительного механизма *2и* и регулирующего клапана *2к*.

САР температуры в сушиле поддерживает заданную температуру в зонах сушила, изменяя расход газа при отклонении температуры от заданного значения. Она включает термопары *3а–3б*, измерительный прибор *3в* с многоканальным (многоточечным) регулирующим устройством, исполнительные механизмы *3г*, *3ж* и регулирующие клапаны *3д*, *3з*, причём клапаны на линиях подачи газа и воздуха к одной горелке механически связаны между собой и перемещаются синхронно.

САР давления газов поддерживает заданное давление в сушиле, ограничивая тем самым потери тепла с уходящими газами и тепла, расходуемого на нагрев подсасываемого в сушило атмосферного воздуха. Эта САР регулирует открытие шибера или интенсивность тяги дымососа. САР давления газов включает в себя тягонапоромер *4а*, измерительный прибор *4б*, регулятор *4в* с задатчиком *4г*, исполнительный механизм *4д* и регулирующий орган *4е* в виде шибера.

На рис. 5.8,а линии связи имеют разрывы с пронумерованными концами. Обычно это делается для того, чтобы избежать на схеме пересечения большого количества таких линий, которое образуется на достаточно сложных схемах. Здесь это сделано, чтобы рассмотреть разные варианты схемы.

Программируемый контроллер, используемый для управления сушилом, выполняет функции всех приборов, расположенных на рис. 5.8,а на щитах (ниже разрывов линий связи).

На функциональной схеме он может быть показан как прибор для измерения, индикации и регулирования нескольких разнородных величин (как прибор UIC) или как прибор UICY - буква Y обозначает выполнение преобразований сигналов и вычислительные функции (рис. 5.8,б; стрелками показаны направления передачи сигналов).

Поскольку из такой схемы не ясно, что же именно делает компьютер, функциональная схема должна сопровождаться приложением, в котором описываются все его функции.

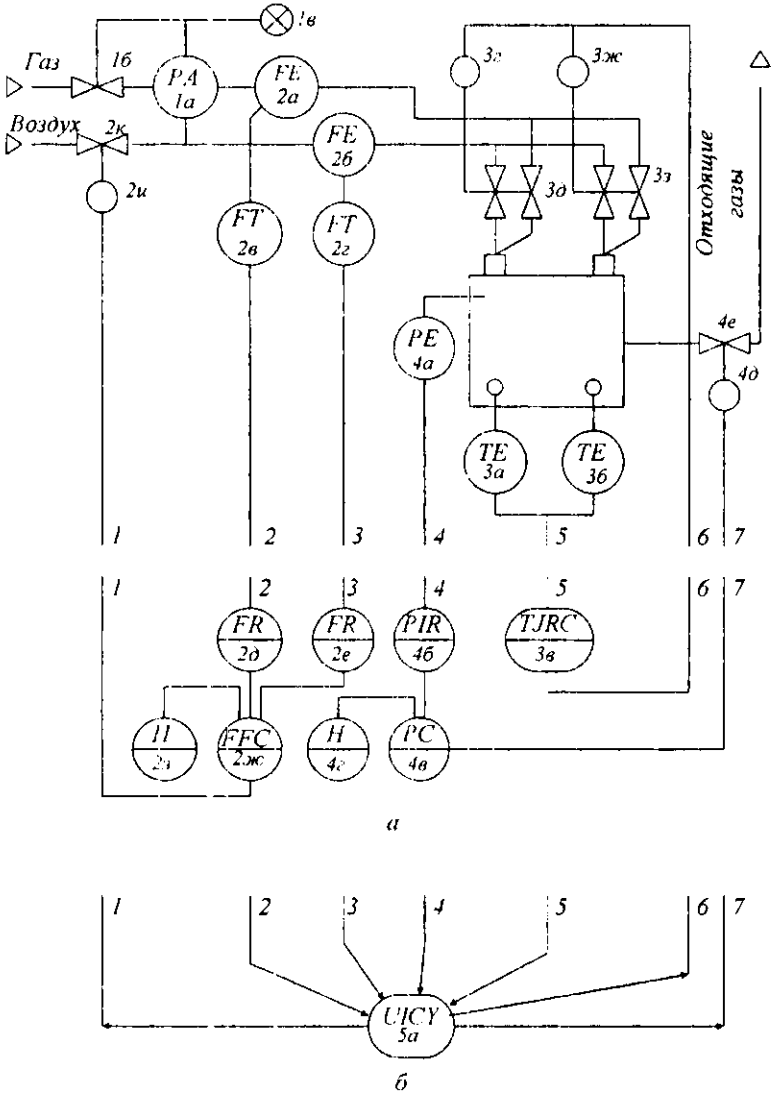


Рис 5.8

Контрольные вопросы

1. Каково назначение функциональных схем систем автоматизации?

2. Как изображаются технологическое оборудование, измерительные устройства и средства автоматизации на функциональных схемах?

3. Какова последовательность символов в обозначении приборов?

4. Как обозначаются вычислительные устройства на функциональных схемах?

5. Как обозначаются средства измерения и управления давлением, температурой, расходом, перемещением?

ГЛАВА 6

АНАЛИЗ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА

§ 1. Постановка задачи управления технологическим процессом

В этой главе речь идёт об анализе технологического процесса, выполняемом для определения задач управления им.

Управление процессом – это такая организация того или иного процесса, которая обеспечивает достижение заданных целей.

Целью управления технологическим процессом является такая его организация, которая обеспечивает выполнение всех его выходных параметров – получение продукции требуемого качества, заданной производительности и экономичности.

Так, цель управления смесеприготовлением – проведение процесса, который позволит получить заданное количество смеси с определённым набором свойств и минимальным расходом исходных материалов. При формовке целью управления является получение формы с требуемой и достаточно равномерной плотностью, отсутствием дефектов полости и т.д.

Таким образом, цели управления определяются назначением процесса. Конкретное содержание его выходных параметров (требований к процессу) излагается в технологической инструкции на этот процесс.

Не следует думать, что разработка управления каким-либо технологическим процессом начинается уже после его создания, то есть разработки или выбора технологии и оборудования. В действительности задачи управления технологическим процессом начинают решаться в ходе его разработки, например при выборе возможных вариантов технологии, выборе или разработке оборудования, когда наряду с другими соображениями (экономичности, производительности) принимаются во внимание те или иные факторы управления процессом. Например, выбор формовочной машины с многоплунжерной головкой или импульсного метода уплотнения определяется стремлением обеспечить равномерное уплотнение смеси в опоке. Равномерность уплотнения является показателем качества формовки, то есть выходным параметром процесса, и входит в круг задач управления.

При выборе или разработке технологии и оборудования закладываются важнейшие решения по управлению. Так, при разработке процесса изготовления стержней в холодной оснастке в ходе исследования процесса было установлено существенное снижение прочности стержней и увеличение времени их отверждения при высокой влаж-

ности воздуха, используемого для надува и продувки, а также сильная зависимость скорости отверждения от температуры смеси. При внедрении нового процесса на одном из заводов были введены следующие технические решения. Для стабилизации температуры и влажности песка введена продувка песка в бункерах тёплым воздухом от компрессора; камера для предварительного охлаждения воздуха, подаваемого в пескострельную головку (для его осушки), и камеры для подогрева этого воздуха, а также смолы и газообразного катализатора до температуры 23–25^0 С.

Все названные здесь конструктивные элементы предназначены для стабилизации входных параметров процесса отверждения стержня в области их оптимальных значений, то есть решают задачи управления процессом.

Часто практически трудно разделить непосредственно разработку технологического процесса и разработку вопросов управления им. При разработке нового или изучении существующего процесса в самом содержании процесса важно увидеть или предусмотреть формирование элементов управления процессом.

Технический контроль процессов и их технологических параметров (автоматический или неавтоматический), промежуточный и конечный контроль вырабатываемой продукции, в том случае, когда по его результатам принимаются управляющие решения (а это и должно быть так), также, очевидно, принимает участие в формировании управления. Примеры тому – контрольный осмотр формы (с последующей при необходимости подналадкой формовочного оборудования), анализ состава сплава и его корректировка по результатам анализа. При разработке системы контроля процесса должна быть предусмотрена выработка информации для системы менеджмента качества предприятия в соответствии со стандартами серии ISO 9000.

Ряд задач управления решается средствами автоматики. Оборудование, на котором выполняется процесс, оснащается соответствующими датчиками, регулирующими устройствами и системами автоматического управления. Однако методы автоматического управления и сама возможность их применения полностью определяются технологическими и конструктивными решениями, принимаемыми при разработке процесса.

При выборе технологии и оборудования определяются внешние условия (качество сырья, характеристики энергоносителей, требования к оснастке и т. п.), необходимые для реализации технологического процесса. Значения этих параметров, а также их допустимые отклоне-

ния формулируются в *ГОСТах, технических условиях, стандартах предприятия, производственных инструкциях.*

Эти документы и реализация содержащихся в них требований путём введения входного контроля, использования сертификатов (документах о соответствии материала требованиям к нему, передаваемых поставщиком продукции) ставят определённые границы колебаниям входных параметров процесса и таким образом стабилизируют их.

Таким образом, задача *управления* технологическим процессом более широкая, чем задача его автоматизации или автоматического управления им. Последняя является частью первой, решаемая средствами автоматического контроля и управления. При этом набор средств зависит от содержания, «начинки» технологического процесса, то есть принятых в нём технологии и оборудования.

Специалист по технологии и оборудованию при разработке технологического процесса или его практическом использовании должен охватывать вопросы управления процессом в целом, использовать для целей управления как специальные средства автоматического управления, так и выбирать технологические и конструктивные решения, обеспечивающие наиболее эффективный путь достижения целей управления.

Другая сторона вопроса заключается в том, что технолог или конструктор, работающий в области литейного производства, должен хорошо знать и использовать возможности средств автоматического управления.

Изложенный выше широкий охват всех аспектов управления полезен ещё и потому, что он вплотную подводит к пониманию места и роли автоматического управления при реализации технологического процесса, формулировке его задач и содержания.

Итак, средствами решения задач управления технологическим процессом являются:

- Применение при разработке процесса таких технологических и конструктивных решений, которые обеспечивают стабилизацию технологических параметров или возможность управления ими.
- Использование ГОСТов, ТУ, СТП, инструкций для стабилизации входных параметров и методы контроля выполнения требований стандартов, то есть входной контроль, использование сертификатов и т.п.
- Применение средств автоматического контроля и управления параметрами процесса.

• Использование для целей управления результатов технического контроля параметров процесса и объектов производства в ходе выполнения процесса и по его завершении.

• Использование рекомендаций системы менеджмента качества, если таковая функционирует на предприятии.

При построении систем управления технологический процесс или оборудование рассматриваются как объект управления, выходными параметрами которого являются требуемые показатели качества (например, свойства изготавливаемой смеси, формы или отливки), технико-экономические показатели, состояние оборудования. Из числа входных воздействий выбираются управляющие воздействия, изменяя которые, можно обеспечить требуемые значения выходных параметров. Другие входные воздействия рассматриваются как возмущающие. Последние могут быть контролируемыми (если есть техническая возможность измерять их) и неконтролируемыми.

Выбранные в качестве управляющих воздействия должны удовлетворять ряду требований:

• должны быть технические средства для целенаправленного изменения величин этих воздействий;

• они должны влиять на изменение соответствующих выходных параметров в необходимом, достаточно широком диапазоне;

• их изменение не должно существенно снижать характеристики процесса (производительность, экономичность и т.п.).

Управляющие воздействия могут реализовываться автоматическими средствами или обслуживающим персоналом. В последнем случае разрабатываются производственные инструкции, стандарты предприятия, технические условия.

§ 2. Структурная схема процесса

Набор параметров, которые должны быть охвачены управлением в ходе выполнения технологического процесса, определяется требованиями к выходным параметрам этого процесса (то есть к качеству продукции) и имеющимися возмущающими воздействиями. Для того чтобы наиболее полно выявить условия формирования выходных параметров процесса, целесообразно составить структурную схему процесса, то есть представить его в виде последовательно или параллельно выполняемых операций или переходов (рис. 6.1,а). Эта схема должна включать операции, выполняемые не только непосредственно с объектом производства (отливкой) или объектом технологического назначения: формой, стержнем и т.п., но и со всеми вспомогательными материалами, используемыми в процессе.

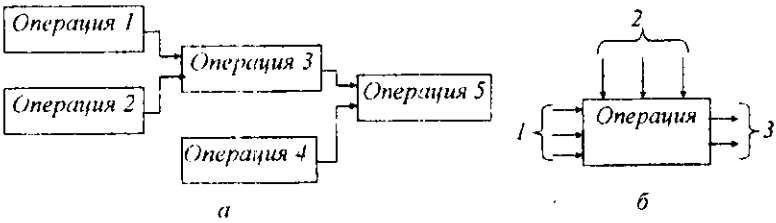


Рис. 6.1

Каждая операция процесса характеризуется своими определёнными входными параметрами (получаемыми на предыдущей операции или характеризующими выполняемую операцию) и выходными параметрами.

Для определённости будем представлять операции процесса прямоугольниками (рис. 6.1,б); входные параметры, формируемые на предыдущей операции, -- стрелками, входящими в левую сторону прямоугольника (1 на рис 6.1,б), параметры выполняемой операции – стрелками, входящими в прямоугольник сверху (2 на рис. 6.1,б), выходные параметры операции – стрелками, выходящими из него вправо (3 на рис. 6.1,б).

На схеме технологического процесса выходные параметры предшествующей операции будут являться входными параметрами последующей операции.

При анализе параметров выполняемой операции допустимо указывать только те из них, которые не остаются постоянными в ходе выполнения процесса и, следовательно, нуждаются в управляющих воздействиях или контроле за ними.

Анализ технологического процесса целесообразно начинать с самой последней его операции.

Рассматривая условия формирования выходных параметров последней операции (которые, очевидно, являются выходными параметрами всего процесса) с привлечением имеющихся знаний о физическом содержании этой операции и условиях её выполнения, следует определить входные параметры и возмущающие воздействия, действующие в данной операции. Для установления зависимости между выходными параметрами и входными и возмущающими воздействиями используются результаты исследований процесса или предшествующий опыт.

Переходя последовательно от последней к предшествующим операциям и повторяя такой анализ для каждой из них, определяют

условия формирования выходных параметров и возмущающие воздействия, действующие в каждой операции анализируемого процесса.

Глубина проработки и анализа связей между выходными и входными параметрами может быть различной.

Для реализации стабилизирующего регулирования достаточно ограничиться представлением этой зависимости в параметрическом виде (то есть без указания числовых значений параметров этой зависимости), ограничиваясь только оценкой величины этой зависимости.

Для управления с использованием математической модели процесса (операции) должна быть известна функциональная или статистическая связь между параметрами.

Выбор между этими вариантами диктуется наличием технических средств для реализации управления, соображениями стоимости того или иного решения, организационными факторами.

Например, обычно отверждение оболочковой формы проводится при стабилизирующем регулировании основных параметров. Такое управление характеризуется определёнными качественными и экономическими показателями.

Но этот же процесс может управляться с использованием математической модели процесса отверждения (он описан в главе 8). Такое управление может оказаться более эффективным в конкретных производственных условиях.

Приведённый ниже пример анализа технологического процесса и (в следующей главе) синтеза системы управления им представляет только простейшую схему выполнения этой задачи. В действительности создание системы управления технологическим процессом, как и любой процесс проектирования, является многовариантным и итерационным, когда при проектировании проверяются различные варианты решения технической задачи. Эти решения реализуются и апробируются. По мере изменения исходных организационных, экономических и технических условий это решение корректируется, совершенствуется или изменяется.

Однако можно отметить общую тенденцию. По мере удорожания стоимости труда, материалов и энергии и при относительном снижении (по отношению к указанным) стоимости средств управления более широкое применение находят сложные системы и средства управления.

§ 3. Пример. Анализ процесса получения стержней

Проведём анализ технологического процесса получения стержней с отверждением продувкой газообразным катализатором на стержневой машине (рис. 6.2).

Стержневая машина предназначена для изготовления стержней из холоднотвердеющей смеси с отверждением продувкой газообразным катализатором в ящиках с вертикальной плоскостью разъёма. На станине машины установлена тележка *1* с пескострельной головкой *2* и плитой продувки *3*. На позиции надува стержня установлены клапан надува *4* и механизм поджима ящика *5*. На позиции загрузки пескострельной головки установлен бункер для смеси *6* с шибером *7*. На станине также закреплён ресивер *8*. На стол машины устанавливается стержневой ящик *9* с приводом раскрытия ящика *10*. Жидкий катализатор хранится в герметичном расходном баке *11*, из которого он подаётся при помощи сжатого воздуха в камеру дозатора *12*. Катализатор дозируется плунжерным насосом *13* и направляется в камеру нагрева *14*, где происходит его испарение. Нагрев камеры производится электрическим нагревателем *15*.

В стержневой машине предусмотрены также механизмы смазки и обдува ящика, выталкивания и съема стержня. Для упрощения схемы в данном случае они не рассматриваются.

Надув и продувка стержня осуществляются осушенным воздухом, получаемым из цеховой системы осушки воздуха. Клапан надува управляется распределителем *16*. Подача воздуха в камеру нагрева для получения смеси паров катализатора с воздухом управляется распределителем *17*, а продувка стержня полученной смесью – распределителем 18.

Механизмы машины приводятся в движение пневмоцилиндрами, управляемыми распределителями *19*.

Циклограмма работы машины, разработанная в ходе проектирования её конструкции, приведена в главе 7 при описании алгоритма управления этой машиной (рис. 7.3).

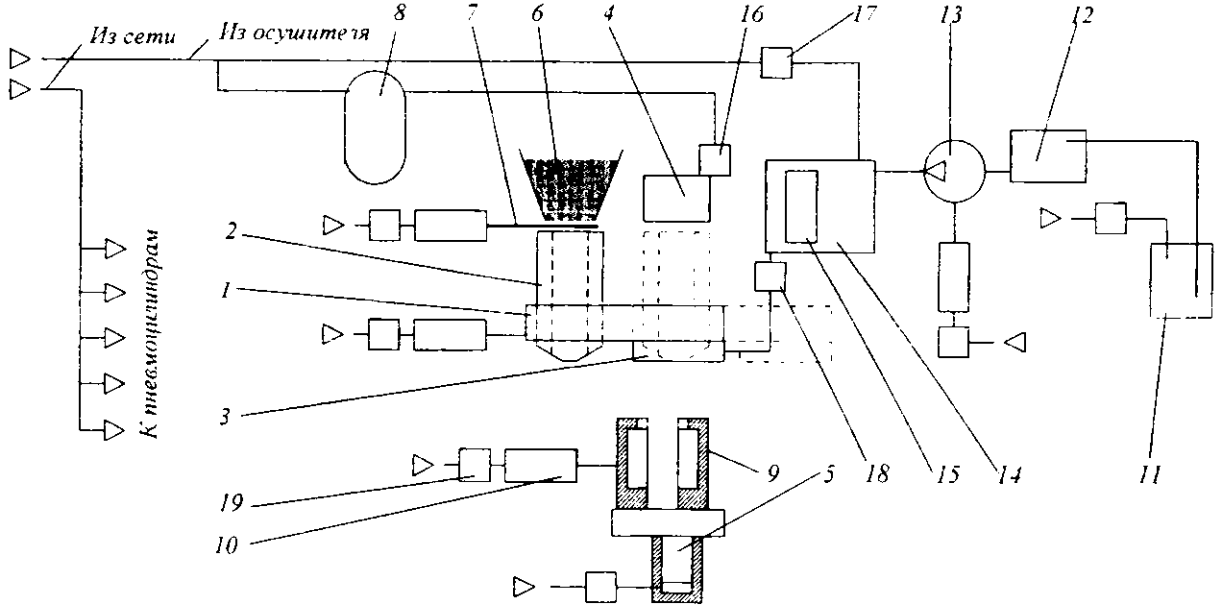


Рис. 6.2

1 – тележка; 2 – пескострельная головка; 3 – плита продувки; 4 – клапан надува; 5 – механизм поджима ящика; 6 – бункер для смеси; 7 – шибер; 8 – ресивер; 9 – стержневой ящик; 10 – привод раскрытия ящика; 11 – расходный бак для катализатора; 12 – камера дозатора; 13 – плунжерный насос; 14 – камера нагрева; 15 – электрический нагреватель; 16–19 – распределители

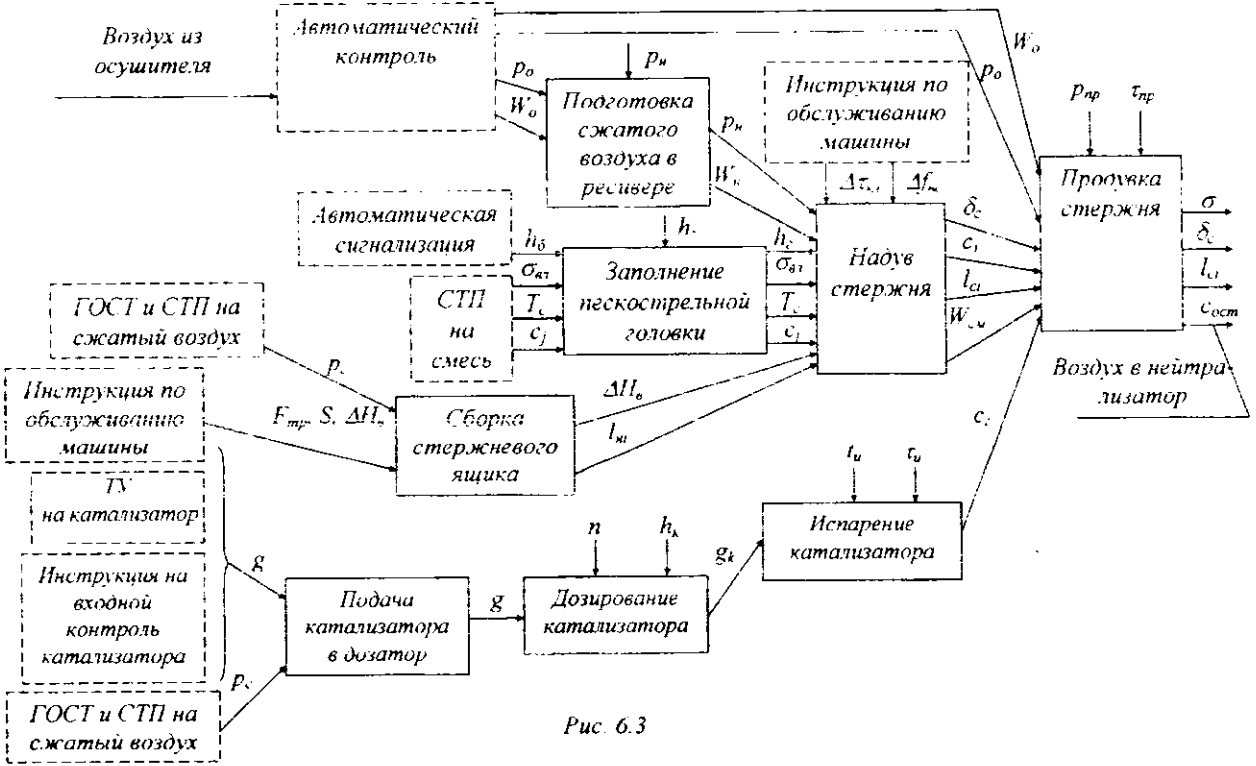

Воздух из осушителя
Автоматический контроль
Подготовка сжатого воздуха в ресивере
Автоматическая сигнализация
Заполнение пескострельной головки
ГОСТ и СТП на сжатый воздух
СТП на смесь
Инструкция по обслуживанию машины
Сборка стержневого ящика
ТУ на катализатор
Инструкция на входной контроль катализатора
ГОСТ и СТП на сжатый воздух
Подача катализатора в дозатор
Дозирование катализатора
Испарение катализатора
Инструкция по обслуживанию машины
Надув стержня
Продувка стержня
Воздух в нейтрализатор

Рис. 6.3

Структурная схема процесса показана на рис. 6.3 (ряд операций, в ходе которых не происходит изменений технологических параметров, на схеме опущен).

Выходными параметрами последней операции (продувки стержня катализатором и воздухом; соответственно, всего процесса) являются:

- прочность стержня σ;
- плотность стержня δ_c;
- геометрическая точность, которую можно характеризовать некоторым количеством n размеров l_{ci} $(i=1...n)$;

Побочным продуктом процесса является воздух, загрязнённый остатками паров амина (его концентрация обозначена $c_{ост}$). Его очистка, проводимая в отдельной установке – нейтрализаторе, в схему процесса не включена.

Прочность σ зависит от основных параметров продувки: давления $p_{пр}$ и времени продувки $\tau_{пр}$, а также от входных параметров: плотности неотверждённого стержня δ_c; состава стержневой смеси c_j $(j=1,...m)$; концентрации газовоздушной смеси $c_г$; влажности сжатого воздуха, подаваемого из осушителя и используемого для продувки $W_в$, влажности смеси $W_{см}$. Имеющееся на входе давление воздуха $p_в$ при выполнении операции должно понижаться до требуемого давления $p_{пр}$.

Плотность стержня δ_c и его точность l_{ci} $(i=1...n)$ полностью определяются входными параметрами последней операции: плотностью δ_c и размерами l_{ci} $(i=1...n)$ неотверждённого стержня.

Испарение жидкого катализатора производится в специальной камере. Выходной параметр процесса – концентрация газовоздушной смеси $c_г$ – зависит от температуры в камере $t_и$, времени испарения $\tau_и$ и входного параметра – количества введённого жидкого катализатора $g_к$.

Дозирование жидкого катализатора выполняется плунжерным насосом, который совершает заданное количество ходов n. Поскольку применяемый способ дозировки обеспечивает высокую точность (погрешнось 0,5%), применяется «жёсткое» управление, без контроля выходного параметра. Однако для гарантированного получения заданной дозы необходимо обеспечить определённый уровень катализатора $h_к$ в расходной ёмкости дозирующего устройства.

Подача жидкого катализатора в дозатор производится из расходной ёмкости при помощи сжатого воздуха (входные параметры – наличие катализатора в расходной ёмкости и сжатый воздух из цеховой сети с давлением $p_в$). Управление (подача сжатого воздуха в расходную ёмкость) осуществляется средствами дискретной автоматики

(распределителем), управляющими циклом стержневой машины, и здесь не приводится. Значения входных параметров обеспечиваются *ГОСТом и СТП на сжатый воздух, ТУ на катализатор*, выполнением *инструкции на входной контроль катализатора и инструкции по обслуживанию стержневой машины.*

При *надуве стержня* формируются выходные параметры операции – свойства сырого стержня: плотность сырого стержня δ_c, состав стержневой смеси c_j $(j=1...m)$, влажность $W_{см}$ и размеры стержня l_{ci} $(i=1...n)$. Возмущающим воздействием при надуве являются: колебания времени срабатывания (открытия) клапана надува $\Delta\tau_к$, и состояние вдувных сопел, которое можно характеризовать отсутствием в них остатков смеси $\Delta f_{вс}$.

Работоспособность клапана надува обеспечивается его техническим обслуживанием, предусмотренным в *инструкции по обслуживанию машины.* Рабочее состояние вдувных сопел обеспечивается *конструкцией машины* (например, их механической прочисткой) или той же *инструкцией по обслуживанию* (периодической прочисткой сопел оператором).

При *надуве* взаимодействуют три компонента: смесь, подготовленная к надуву в пескострельном резервуаре, сжатый воздух, подготовленный в ресивере машины, и собранный для надува стержневой ящик. Они обеспечивают входные параметры этой операции.

Входными параметрами операции надува, сформированными на предшествующих операциях, являются: давление сжатого воздуха в ресивере $p_н$ и его влажность $W_н$, которая повлияет на влажность стержня при его продувке; количество смеси в пескострельной головке (оно может характеризоваться уровнем смеси в ней $h_г$), характеристики смеси: её состав c_j, сырая прочность $\sigma_{сж}$ и текучесть T_c; размеры стержневого ящика $l_{яi}$ $(i=1...n)$ и состояние вент стержневого ящика, которое можно характеризовать изменением их гидравлического сопротивления $\Delta H_в$.

Подготовка сжатого воздуха в ресивере заключается в заполнении его сжатым воздухом. Поскольку влажность сжатого воздуха в цеховой сети может быть выше допустимого уровня, требуемого технологическим процессом, предусмотрено питание пескострельной головки (так же как и системы продувки стержня) осушенным воздухом из установки осушки воздуха с давлением $p_о$ и влажностью $W_о$. Эти входные параметры контролируются автоматическими приборами. Требуемое давление надува $p_н$ следует установить в ресивере автоматическим регулятором.

Пескострельная головка заполняется смесью из бункера машины через шиберное устройство. Перед выстрелом уровень смеси h_c в головке не должен быть ниже минимального.

Входными параметрами при заполнении пескострельной головки являются: количество смеси в бункере, которое можно характеризовать её уровнем в бункере $h_б$, и характеристики смеси (c_j, $\sigma_{вл}$, T_c).

Наличие смеси в бункере проверяется автоматическим контролем и сигнализацией, а свойства смеси обеспечиваются СТП (стандартом предприятия) на смесь.

Входным параметром операции сборки стержневого ящика является сжатый воздух в приводе закрытия ящика с давлением $p_в$, а также состояние ящика: силы трения в приводе ящика $F_{тр}$, наличие частиц смеси толщиной S на поверхностях разъёма ящика и состояние вент $\Delta H_в$.

Для упрощения приводимого примера будем считать, что размеры $l_{ст}$ определяются только зазором между половинками ящика после его смыкания $S\delta$. Другие факторы, например, износ ящика, рассматривать не будем.

Давление и качество сжатого воздуха установлены ГОСТом и СТП на сжатый воздух, а остальные входные параметры поддерживаются на требуемом уровне согласно инструкции по обслуживанию машины.

В ходе анализа технологического процесса необходимо указать ожидаемые или предельные значения контролируемых технологических параметров (табл. 6.1).

Таблица 6.1

Параметр	Размерность	Значение
Давление воздуха в сети	МПа	0,6
Давление воздуха из осушителя	МПа	0,6
Относительная влажность осушенного воздуха (ожидаемая и максимальная)	%	40 и 100
Давление надува стержня	МПа	0,45
Время надува	с	0,1
Давление продувки стержня смесью газов	МПа	0,05–0,1
Время продувки стержня смесью газов	с	3–5
Давление продувки стержня воздухом	МПа	0,15–0,25
Время продувки стержня воздухом	с	10–20
Расход катализатора	г/кг смеси	< 1,5
Температура в камере нагрева	^{0}C	120
Мощность нагревателя камеры	кВт	3

На этом анализ выходных, входных и возмущающих воздействий по структурной схеме технологического процесса заканчивается.

Надо отметить, что структурная схема процесса может строиться с разной степенью детализации. Это зависит от того, насколько глубоко необходимо проанализировать процесс. Например, ставится задача разработать управление для существующего процесса или необходимо выявить возможные пути совершенствования процесса.

Контрольные вопросы

1. Какие средства используются для управления технологическим процессом?

2. Какова последовательность выполнения анализа технологического процесса, проводимого с целью разработки управления им?

3. Каким требованиям должны удовлетворять воздействия на процесс, выбираемые в качестве управляющих?

ГЛАВА 7

СИНТЕЗ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ

§ 1. Методы управления

Задачи управления технологическим процессом определяются в ходе его анализа (глава 6).

Те или иные методы управления связаны с определёнными техническими решениями, принятыми при разработке технологического процесса. Часто именно необходимость улучшения качества управления процессом или даже возможности автоматизации управления порождает технические решения, принимаемые при создании нового технологического процесса. Поэтому принятые в технологическом процессе решения диктуют многие вопросы управления.

В ходе анализа технологического процесса определяются те возмущающие воздействия, которые должны подвергнуться управляющим воздействиям, и принимаются решения о методах управления ими. При этом делается выбор между следующими вариантами:

- ввести автоматическое регулирование (по отклонению или возмущениям) или управление параметром;
- ввести автоматический контроль параметра;
- поддерживать требуемое значение параметра посредством периодического обслуживания оборудования;
- возложить задачу стабилизации параметра (для входных параметров) на технические системы, взаимодействующие с автоматизируемым процессом.

Условия выбора тех или иных решений рассмотрены ниже.

Автоматическое регулирование или управление параметром

Выбор метода управления начинается с определения возможности применения автоматического регулирования и управления.

Задачи регулирования и управления определяются конкретным содержанием технологического процесса, зависимостями между технологическими параметрами, возможностями их автоматического измерения и воздействия на них.

Отказываться от автоматического регулирования и управления приходится в следующих случаях:

– динамические характеристики объекта (например, большие запаздывания) не позволяют эффективно применить автоматическую систему регулирования или управления;

– применение автоматической системы регулирования или управления экономически нецелесообразно;

– отсутствуют технические средства для такого управления (датчики соответствующих параметров, средства воздействия на изменение хода процесса в необходимом направлении и т.п.).

Для процесса автоматического управления выбирается один из следующих методов:

– регулирование стабилизирующее;

– регулирование программное;

– управление параметром в функции от значений некоторых других параметров (следящее регулирование);

– управление параметром на основе анализа результатов выполнения технологического процесса в предшествующие моменты времени.

Регулирование может быть позиционным (это наиболее дешёвый способ, не требующий дорогостоящих регулирующих устройств) или непрерывным (с использованием пропорционального, дифференциального, интегрального законов регулирования или их сочетаний), с корректировкой коэффициентов передачи и постоянных времени регулирующего устройства (для объектов с переменными динамическими характеристиками) и т.д.

Осуществить регулирование можно измерительными приборами (со встроенными позиционными или непрерывными регуляторами) или программируемыми контроллерами (ПК) в сочетании с соответствующими датчиками, исполнительными механизмами и регулирующими органами.

Управление параметром в функции от значений некоторых других параметров можно выполнить при помощи измерительных приборов со встроенными регуляторами соотношения, специально сконструированными приборами для реализации требуемых законов управления или ПК.

В настоящее время управление сложными технологическими процессами, реализуемыми на комплексном или сложном оборудовании (например, установки приготовления смеси с системами дозирования, машины литья под давлением, автоматические формовочные линии), обычно осуществляется с помощью ПК, которые выполняют и задачи логического управления (управление циклом машины или системы), и задачи регулирования.

Управление на основе анализа результатов процесса требует обработки большого количества числовой информации, поэтому выполняется на ЭВМ.

Автоматический контроль параметра

Автоматический контроль параметра вводится с тем, чтобы по его результатам оператор принимал одно из решений:

– продолжать выполнение технологического процесса и принять меры к устранению возникшего отклонения параметра, которое в дальнейшем может достичь недопустимой величины;

– остановить выполнение процесса и принять меры к устранению недопустимого отклонения параметра.

Автоматический контроль параметра может выполняться в виде:

– световой или звуковой сигнализации, подаваемой при достижении определённой величины параметра;

– показания значения параметра на измерительном приборе;

– регистрации значения параметра регистрирующим прибором.

Помимо сигнализации, можно также предусмотреть автоматическое отключение или переключение оборудования.

Выбор одного из вариантов автоматического контроля зависит от важности контролируемого параметра, возможности его изменения в процессе работы, от способа использования показаний прибора.

Если важно знать не только текущее значение параметра, но и значения в предшествующие моменты времени, предусматривается регистрация параметра. Сигнализирующий прибор применяется, если отклонение параметра требует привлечение внимания оператора, может создать аварийную ситуацию или повлечь за собой брак вырабатываемой продукции.

Стабилизация параметра путём периодического обслуживания оборудования.

Стабилизация некоторых параметров выполняется путём периодического обслуживания оборудования, например чисткой, подналадкой, ремонтом. Содержание таких работ излагается в технологических инструкциях или инструкциях по эксплуатации оборудования.

Стабилизация входных параметров в смежных технических системах

Задачу стабилизации некоторых входных параметров можно возложить на системы, обеспечивающие автоматизируемый процесс материалами, сырьём, заготовками, энергоносителями. Требования к этим параметрам (их величина и допустимые колебания) содержатся в ГОСТах, ОСТах, СТП (стандартах предприятия), ТУ (технических условиях), инструкциях по входному контролю на материалы, получаемые со стороны или из смежных производственных участков.

§ 2. Выбор средств измерения и управления процессом

Выбор средств измерения определяется:

- видом и пределами изменений контролируемых параметров;
- требуемой точностью измерений;
- требуемым быстродействием;
- конструкцией агрегата и режимом его работы;
- совокупностью характеристик контролируемой и окружающей среды (давлением, температурой, запылённостью, агрессивностью и т.д.;
- условиями монтажа, обслуживания и ремонта;
- экономическими показателями;
- требуемым характером представления информации.

Динамические характеристики измерительного устройства не должны по возможности ухудшать динамические свойства объекта. Быстродействие измерительного устройства должно быть выше, чем возможная скорость изменения контролируемого параметра. Так, если объект управления и измерительный прибор в динамическом отношении характеризуются как инерционные объекты с запаздыванием, то при выборе измерительной аппаратуры руководствуются соотношениями:

$$\tau_{изм} \le (0{,}2 \div 0{,}3)\tau_{об}; \; T_{изм} \le (0{,}2 \div 0{,}3)T_{об},$$

где $\tau_{изм}$, $\tau_{об}$, $T_{изм}$, $T_{об}$ – время запаздывания и постоянная времени измерительного прибора и объекта управления соответственно.

Конструктивные особенности объекта управления иногда оказывают решающее влияние на выбор средств измерения. Например, в пламенных печах невозможно контролировать температуру металла при помощи визированных на него пирометров из-за влияния на них факела газа. Температура в них контролируется термопарами или пирометрами, визированными на дно огнеупорных стаканов, погружённых в металл.

Вид представления результатов контроля оператору должен выбираться, основываясь на данных специальной области науки – инженерной психологии, которая изучает вопросы согласования характеристик технических устройств с психофизиологическими характеристиками оператора с целью обеспечения эффективной работы как оператора, так и системы «человек – машина» в целом.

Одной из наиболее рациональных форм представления информации о работе сложного оборудования является использование монитора с выводом на его экран фрагментов мнемосхемы объекта с наложенной на неё цифровой информацией о значениях параметров. Мнемосхема представляет собой схематическое изображение функциональной схе-

мы технологического объекта или его отдельных частей. На неё в соответствующих точках накладывается динамическая информация (параметры процесса, положение механизмов, включение приводов и т.д.). По команде с клавиатуры вызывается заданный фрагмент мнемосхемы. С помощью мнемосхемы оператор получает информацию о значении параметров и соответствии их заданным величинам, положении механизмов, работе регуляторов и других устройств.

На мониторе указываются все действительные и требуемые значения рабочих параметров отдельных агрегатов автомата.

Значения отдельных параметров вводятся и изменяются нажатием на соответствующую кнопку. Все данные по управлению и обслуживанию установки могут заноситься в накопитель управляющего процессора и сохраняться на дискете в качестве документа о состоянии установки.

Примеры содержания экранов, которые представляются на мониторе ПК:

- Состояние и работа отдельных элементов сложной системы.
- Состояние и работа транспортной системы (ленточных конвейеров и элеваторов).
- Технологическая схема установки.
- Перечень технологических параметров установки или процесса. Для каждого параметра представляется следующая информация: установленное значение, верхнее и нижнее допустимые отклонения, действительное значение (если параметр в допуске – высвечивается зеленая кнопка, если фиксируется выход из поля допуска – высвечивается красная). Если фиксируется выход из поля допуска – возможны варианты: подача сигнала, остановка машины, команда «отправить отливку в отдельный короб для дальнейшего контроля».
- Многоэтапная переработка (сушка или регенерация песка, подготовка отработанной смеси).
- Процессы (графики давления и скорости при литье под давлением).
- Рецептуры смесей.
- Сравнение режимов получения отливки при разных настройках машины.
- Параметры запрессовки (при литье под давлением): скорость поршня, ход поршня, ход впрыска, температуры металла, мундштука, формы, давление на металл и в гидросистеме, время заполнения формы и время цикла.

Часто проектируются раздельно рабочие и аварийные экраны. На рабочем экране даётся информация для нормального хода процес-

са, на аварийном – информация о неисправностях или критическом состоянии объекта.

§ 3. Пример. Управление процессом получения стержней

Продолжим работу с процессом, который был проанализирован в главе 6.

Ограничимся вопросами управления непосредственно технологическим процессом и исключим следующие вопросы:

- Сбор, накопление и передача на верхний уровень АСУ ТП технико-экономической информации о процессе.
- Контроль состояния и наладки технологического оборудования.
- Разработка видов представления оператору информации о перечисленных выше разделах управления.

Функциональная схема системы управления

Анализ схемы технологического процесса выявил необходимость контроля или управления рядом параметров. Принимаемые в дальнейшем решения по управлению будем вносить в функциональную схему автоматизации процесса (рис. 7.1). Для наглядности будем формировать эту схему вначале из отдельных систем.

Контроль сетевого воздуха (система 1). По имеющемуся опыту давление в цеховой сети достаточно стабильно. Надо также учесть, что при проектировании машины учитывается аварийная ситуация, возникающая при внезапном понижении давления. Для этого случая предусматриваются специальные конструктивные меры. Вводить сигнализацию или блокировку нецелесообразно, достаточно установить манометр (поз. *1а, 1б*) для его контроля.

Для контроля *давления осушенного воздуха*, поступающего из осушителя, устанавливается манометр с контактным устройством для блокировки стержневой машины при высокой влажности (*система 2*).

Качество осушки зависит от ряда факторов (исходной влажности воздуха, состояния фильтров, своевременного слива конденсата из системы), и при нарушении соответствующей инструкции возможно превышение допустимой влажности. Поэтому устанавливается прибор с автоматической сигнализацией и устройством, отключающим машину (*система 3*).

Наличие смеси в бункере машины контролируется ёмкостным уровнемером *4а*, фиксирующим нижний допустимый уровень смеси. Реле уровня *4б* сигнализирует о необходимости пополнить бункер (*система 4*).

Давление в ресивере регулируется регулятором прямого действия *5а* и контролируется манометром с отключающим устройством *5в* (*система 5*).

Количество смеси в пескострельной головке обеспечивается системой дозирования, которая включается программой управления циклом. По её команде (через реле *6б*) шибер открывается, а закрывается после получения сигнала датчика уровня *6а* (*система 6*).

Подача жидкого катализатора из расходного бака в расходную ёмкость дозирующего устройства обеспечивается программой управления циклом машины, которая включает распределитель для подачи сжатого воздуха в расходный бак на заданное время. Поэтому *система 7* здесь не приводится.

Уровень катализатора в ёмкости дозатора стабилизируется регулятором уровня прямого действия (*система 8*).

Дозирование катализатора при его подаче в камеру нагрева производится плунжерным насосом (*система 9*). Работа этой системы описана в главе 5 (см. рис. 5.7).

Температура в камере нагрева регулируется системой позиционного регулирования, управляющей нагревателем *15* (см. рис. 6.2) и состоящей из датчика температуры *10а*, измерительного прибора с индикацией показаний и позиционным регулирующим устройством *10б* и контактора 10*в* (*система 10*). Регулирующий прибор имеет контактное устройство, используемое в системе управления циклом для блокировки работы машины при недостаточной температуре в камере.

Время испарения катализатора задаётся циклограммой машины.

Различные варианты регулирования давления воздуха при продувке рассмотрены в §2 «Программное управление» главы 8. Здесь для упрощения схемы условно принят режим продувки с постоянным давлением, задаваемым редуктором давления *11а* при открытии распределителя *11б* на заданную выдержку времени (*система 11*).

При разработке схемы принято, что все инструкции и стандарты обеспечиваются организационными мерами (кроме давления сетевого и влажности осушенного воздуха). Эти параметры дополнительно контролируются системой управления.

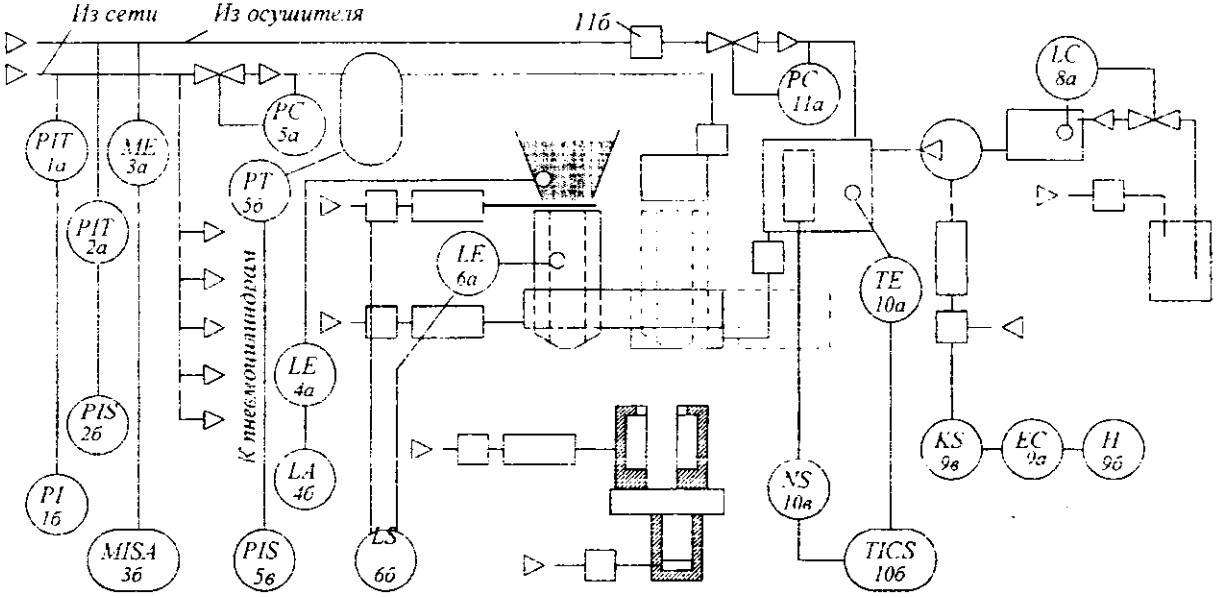

Из сети
Из осушителя
11б
PC 11а
LC 8а
PC 5а
PIT 1а
ME 3а
PT 5б
PIT 2а
LE 6а
TE 10а
К пневмоцилиндрам
LE 4а
PIS 2б
LA 4б
KS 9в
EC 9а
H 9б
PI 1б
MISA 3б
PIS 5в
LS 6б
NS 10в
TICS 10б

Рис. 7.1

Алгоритм управления циклом машины

В этом разделе будет разработана граф-схема алгоритма управления машиной для изготовления стержней (см. рис. 6.2).

Назвать составление граф-схемы алгоритма синтезом системы управления можно только с некоторыми оговорками.

Дело в том, что при ручном составлении схемы дискретного (релейного) управления алгоритм управления представляет собой по существу только описание требований к системе управления, только техническое задание на разработку этой схемы. Затем этот алгоритм подвергается специальной обработке, в результате которой получается требуемая релейная схема.

Для программируемого контроллера программа управления релейной схемой может составляться специальными программными средствами. Например, задачу управления возможно изложить на языке релейных диаграмм в виде граф-схемы алгоритма для программы ISa GRAF, и требуемая программа управления будет составлена автоматически. Таким образом, разработка граф-схемы алгоритма управления является содержательной частью синтеза схемы управления, а формальную часть работы выполняет программа-разработчик.

На рис. 7.2 показана разработанная выше функциональная схема системы автоматизации и добавлены элементы управления, используемые для управления циклом машины (система *12*). Линии связи этой системы не показаны. Пронумерованы пневмоцилиндры приводов машины. Цилиндр *Ц 5* привода насоса дозатора не контролируется конечными выключателями, так как работает с небольшими усилиями в хороших условиях. Перемещения поршней других цилиндров контролируются конечными выключателями. Для контроля усилия поджима к ящику перед выстрелом – давление в цилиндре *Ц 2* контролирует реле давления *PS* (поз. *12 – 9*).

Циклограмма работы машины представлена на рис. 7.3. На циклограмме выше графиков работы механизмов и аппаратов указаны переходы, выполняемые механизмами машины, а ниже этих графиков – работа системы приготовления газообразного катализатора и продувки стержня.

Для упрощения этого учебного алгоритма в циклограмме опущены операции выталкивания и удаления стержня, нет управления дверцами герметичной кабины и удаления паров катализатора из трубопроводов (наличие паров катализатора может нарушить процесс его дозирования, поэтому должно быть предусмотрено удаление этих паров из системы). Кроме того, упрощен режим продувки – продувка стержня смесью газов и воздухом *условно* выполняются при одном и том же давлении воздуха.

При управлении циклом машины используется информация о значениях некоторых технологических параметрах, контролируемых системой автоматизации технологического процесса (см. рис. 7.1).

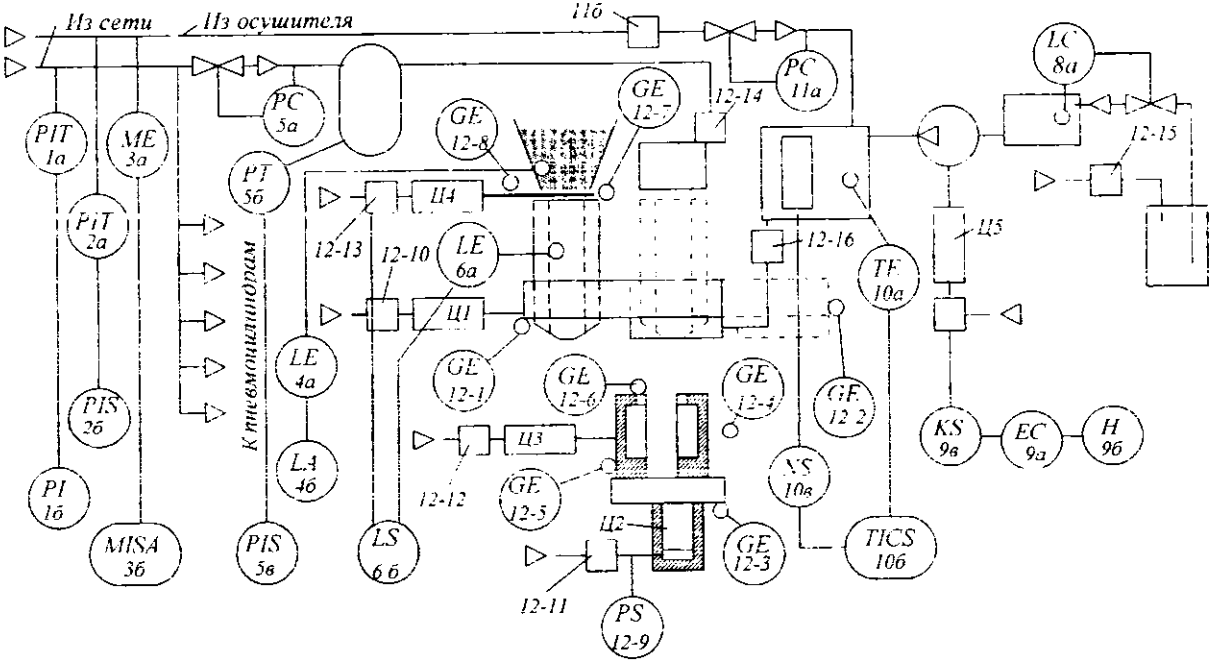

Из сети
Из осушителя
11б
PC 11а
LC 8а
PC 5а
GE 12-8
GE 12-7
12-14
12-15
PIT 1а
ME 3а
PT 5б
Ц4
12-13
12-10
LE 6а
12-16
Ц5
TE 10а
PIT 2а
Ц1
К пневмоцилиндрам
LE 4а
GE 12-1
GE 12-6
GE 12-4
GE 12-2
KS 9в
EC 9а
H 9б
PIS 2б
Ц3
LA 4б
12-12
GE 12-5
YS 10в
PI 1б
Ц2
GE 12-3
TICS 10б
MISA 3б
PIS 5в
LS 6б
12-11
PS 12-9

Рис. 7.2

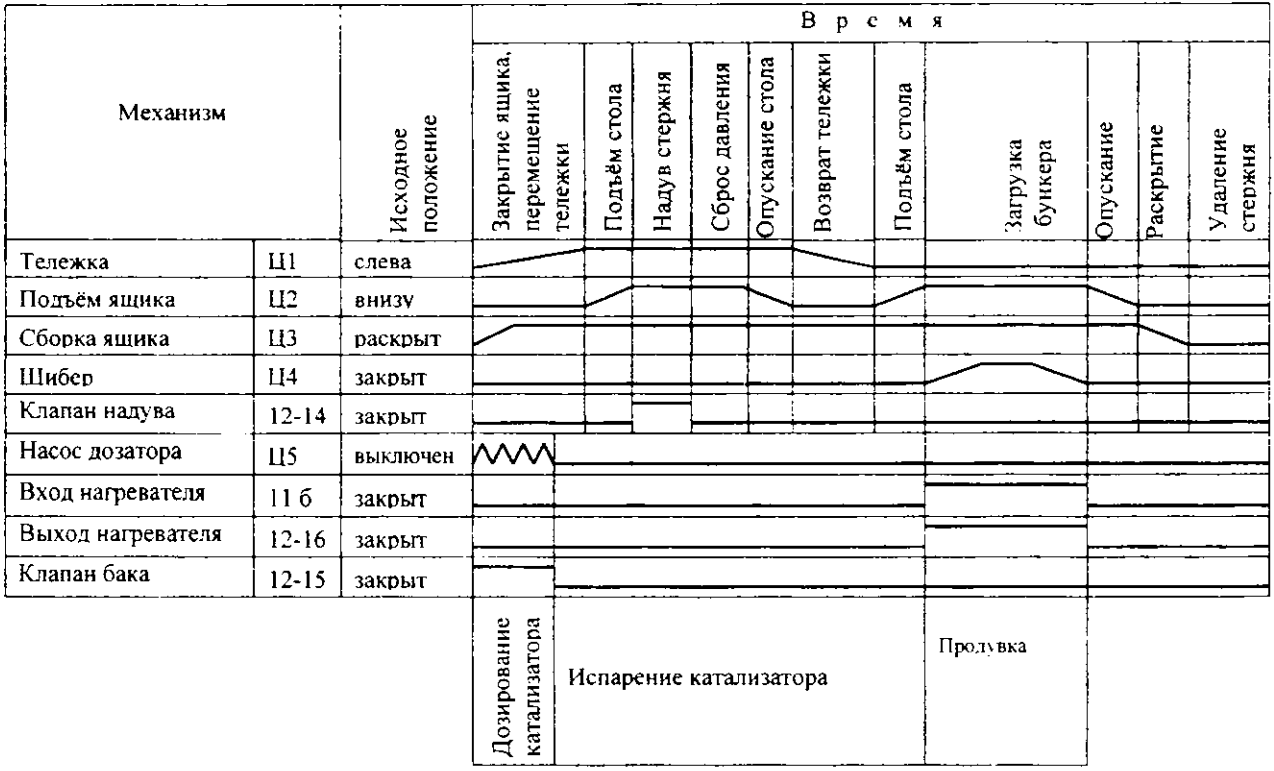

Механизм
Исходное положение
Время
Закрытие ящика, перемещение тележки
Подъём стола
Надув стержня
Сброс давления
Опускание стола
Возврат тележки
Подъём стола
Загрузка бункера
Опускание
Раскрытие
Удаление стержня
Тележка
Ц1
слева
Подъём ящика
Ц2
внизу
Сборка ящика
Ц3
раскрыт
Шибер
Ц4
закрыт
Клапан надува
12-14
закрыт
Насос дозатора
Ц5
выключен
Вход нагревателя
11 б
закрыт
Выход нагревателя
12-16
закрыт
Клапан бака
12-15
закрыт
Дозирование катализатора
Испарение катализатора
Продувка

Рис. 7.3

Машина показана в исходном положении при автоматическом режиме работы (см. рис. 7.2). В исходном положении должны быть нажаты конечные выключатели 12-1, 12-3, 12-5, 12-7.

Условия, которые должен проверять алгоритм управления, и команды, которые он должен вырабатывать, указаны в таблице 7.1.

Таблица 7.1

Условие или команда	Назначение	Аппарат управления
1	*2*	*3*
g_1	Тележка под бункером	Конечный выключатель 12-1
g_2	Тележка над ящиком	Конечный выключатель 12-2
g_3	Стол внизу	Конечный выключатель 12-3
g_4	Стол прижат к тележке	Конечный выключатель 12-4
g_5	Ящик раскрыт	Конечный выключатель 12-5
g_6	Ящик закрыт	Конечный выключатель 12-6
g_7	Шибер закрыт	Конечный выключатель 12-7
g_8	Шибер открыт	Конечный выключатель 12-8
p_3	Давление поджима есть	Реле давления *12-9*
$p_н$	Давление в ресивере есть	Прибор *5 в*
m	Влажность допустимая	Прибор *3 б*
$t_к$	Температура в камере требуемая	Прибор *10 б*
$p_н$	Давление осушенного воздуха	Прибор *2 б*
h	Смесь в голове есть	Реле уровня *6 б*
n	Доза катализатора есть	Прибор *9 а*
$\tau_н$	Время надува стержня	Таймер
$\tau_с$	Время сброса давления	Таймер
$\tau_{пк}$	Время продувки катализатора	Таймер
$\tau_{пв}$	Время продувки воздуха	Таймер
$\tau_{ик}$	Время испарения катализатора	Таймер
$\tau_{уд}$	Время удаления стержня	Таймер
K	Команда на начало цикла	Кнопка «Пуск»
R_1	Включить Ц1 на позицию надува	Распределитель 12-10
$-R_1$	Включить Ц1 на позицию загрузки	Распределитель 12-10
R_2	Включить Ц2 на поджим ящика	Распределитель 12-11
R_3	Включить Ц2 на опускание	Распределитель 12-11
R_3	Включить Ц3 на закрытие ящика	Распределитель 12-12
$-R_3$	Включить Ц3 на раскрытие ящика	Распределитель 12-12
R_4	Включить Ц4 на открытие шибера	Распределитель 12-13

Продолжение табл. 7.1

1	2	3
$-R_4$	Включить Ц4 на закрытие шибера	Распределитель 12-13
$K_н$	Открыть клапан надува	Распределитель 12-14
$-K_н$	закрыть клапан надува	Распределитель 12-14
$K_к$	Открыть клапан бака	Распределитель 12-15
$-K_к$	закрыть клапан бака	Распределитель 12-15
$K_{пр}$	Открыть выход камеры нагрева	Распределитель 12-16
$-K_{пр}$	закрыть выход камеры нагрева	Распределитель 12-16
$K_{кн}$	Открыть вход камеры нагрева	Распределитель *11б*
$-K_{кн}$	закрыть вход камеры нагрева	Распределитель *11б*
P	Команда на включение дозатора	Прибор *9в*
$-P$	Команда на выключение дозатора	Прибор *9в*

Структура алгоритма, разработанного по этим данным, имеет следующий вид (рис. 7.4). Вначале проверяется исходное положение механизмов машины и соответствие технологических параметров требуемым значениям. Затем граф разветвляется. В одной ветви работают механизмы машины и надувается стержень. Управление ведётся по конечным выключателям. В другой ветви готовится катализатор с управлением по времени.

Дозирование катализатора ведётся по отдельной программе, которая запускается из этого алгоритма. Алгоритм управления дозированием описан в главе 5. Затем алгоритм управления циклом получает сигнал об окончании дозирования и продолжает работу.

Составленный алгоритм следует проверить. Количество включений и выключений каждого механизма должно быть одинаковым.

Проверка схемы показывает, что она не контролирует открытие шибера соответствующим конечным выключателем. Открытие шибера косвенно проверяет реле уровня *6а*, которое срабатывает при заполнении пескострельной головки смесью. Конечный выключатель g_4 (поз. *12-8* на рис. 7.2) может быть исключён из схемы.

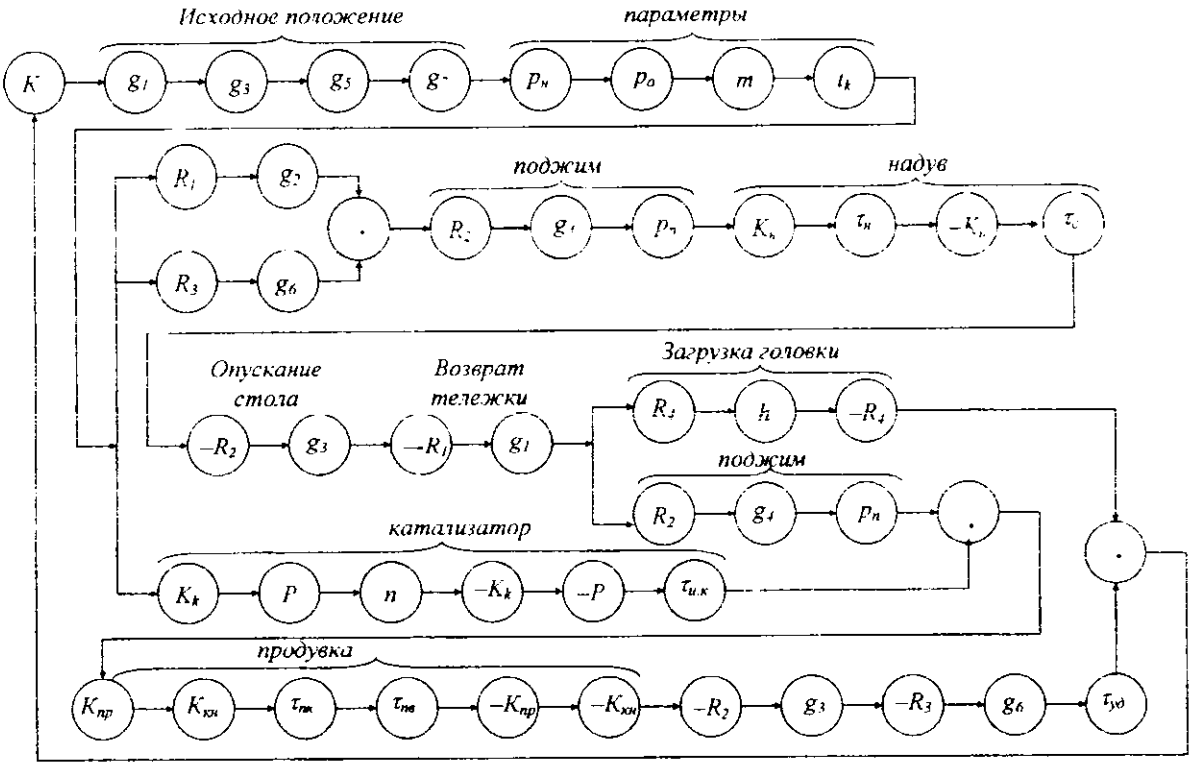

Исходное положение
параметры
поджим
надув
Опускание стола
Возврат тележки
Загрузка головки
поджим
катализатор
продувка

Рис. 7.4

Контрольные вопросы

1. У каких цилиндров не контролируются конечные положения и почему?

2. Измените циклограмму так, чтобы увеличить время испарения катализатора, не меняя длительности отдельных переходов.

3. Измените алгоритм управления так, чтобы он обеспечивал сигнализацию о неполадках в исходном положении.

4. Замените приборы, обеспечивающие контроль технологических параметров, на приборы с сигнализацией.

ГЛАВА 8

МЕТОДЫ И АЛГОРИТМЫ УПРАВЛЕНИЯ

В этой главе рассмотрены различные методы и подходы к решению задач управления литейными процессами. Цель этого изложения – не указать, что лучше, а показать то многообразие методов и средств, которые есть сегодня в распоряжении инженера для решения стоящих перед ним задач.

Вопросы управления раскрываются в тесной связи с конструкторскими и технологическими решениями, принятыми в процессах. Часто видна «обратная связь», когда необходимость обеспечить более эффективное управление процессом диктует те или иные конструкторские и технологические решения.

Функциональные схемы, включенные в данную главу, представлены в виде систем, состоящих из отдельных приборов. Большинство из них может выполняться, а некоторые изначально исполнялись средствами вычислительной техники.

§ 1. Стабилизирующее регулирование

Алгоритмы (законы) регулирования

Регулирующие устройства в системах автоматизации служат для обеспечения поддержания регулируемого параметра на заданном уровне. Качество регулирования во многом определяется алгоритмом функционирования регулятора.

Законом или алгоритмом регулирования называют математическую зависимость между выходным регулирующим воздействием регулятора $y_{рег}(\tau)$ и входным отклонением δ регулируемой величины $y_д$ от заданного значения $y_з$:

$$y_{рег}(\tau) = f(\delta(\tau)),$$

где $\delta(\tau) = y_з - y_д(\tau)$.

Применяется непрерывное, позиционное (релейное) и импульсное (прерывистое) регулирование.

При непрерывном регулировании в регулятор постоянно поступает выходной сигнал, и сам регулятор также непрерывно выдает управляющее воздействие на объект регулирования.

При позиционном (релейном) регулировании в регулятор непрерывно поступает выходной сигнал, но регулятор выдает управляющее воздействие на объект регулирования только тогда, когда отклонение выходного сигнала

объекта от его заданного значения превысит некоторую величину. При этом управляющее воздействие постоянно и не зависит от величины рассогласования. Такое регулирование выполняется релейными устройствами. Поэтому при позиционном регулировании выходная величина непрерывно совершает автоколебания около заданного значения.

Релейное регулирование осуществляется более простыми устройствами, чем непрерывное. Недостатками релейного регулирования являются: меньшая точность по сравнению с непрерывными САР, повышенные тепловые или динамические нагрузки, большее число срабатываний элементов САР.

Импульсное (прерывистое) регулирование заключается в том, что регулятор после выдачи очередного управляющего воздействия на объект регулирования делает определенную временную выдержку и лишь затем производит сравнение выходной величины с заданным значением и вырабатывает новое управляющее воздействие. Временная выдержка делается для того, чтобы инерционный объект успел прореагировать на управляющее воздействие.

Ориентировочно метод регулирования выбирается по значению коэффициента β, характеризующему отношение времени запаздывания τ, и постоянной времени T объекта регулирования: $\beta = \tau/T$. При $\beta < 0{,}2$ обычно принимается позиционное регулирование, при $0{,}2 < \beta < 1{,}0$ – непрерывное регулирование и при $\beta > 1{,}0$ – импульсное.

Эти рекомендации обусловлены тем, что при малых значениях β амплитуда колебаний при релейном регулировании будет сравнительно невелика, а при больших запаздываниях целесообразно обеспечить выдержку после введения управляющего воздействия, чтобы объект мог прореагировать на это воздействие.

В практике принято рассматривать три типовых закона непрерывного регулирования: пропорциональный П, интегральный И, дифференциальный Д. На базе этих законов в регулирующих устройствах реализуются более сложные алгоритмы, являющиеся комбинацией основных законов: пропорционально-интегральный ПИ, пропорционально-дифференциальный ПД, пропорционально-интегрально-дифференциальный ПИД.

Пропорциональный *закон регулирования* определяется уравнением:

$$y_{рег} = K_p \delta(\tau),$$

где K_p – коэффициент пропорциональности (передачи).

Он обеспечивает при появлении ошибки регулирования δ мгновенное сообщение объекту регулирования регулирующего воздействия, направ-

ленного в сторону, обратную отклонению регулируемой величины от заданной.

П-закон регулирования реализуется пропорциональными (статическими) регуляторами, которые обеспечивают высокое быстродействие, более устойчивы по сравнению с другими регуляторами, но имеют статическую ошибку регулирования, которая выражается в том, что при появлении возмущающего воздействия новое установившееся (после отработки этого возмущения регулятором) значение регулируемой величины будет иметь некоторое отклонение (статическую ошибку регулирования) от заданного значения.

Интегральный закон регулирования определяется уравнением:

$$y_{рег} = \frac{1}{T_и}\int_0^{\tau}\delta(\tau)d\tau \text{ или } \frac{dy_{рег}}{d\tau} = \frac{1}{T_и}\delta(\tau),$$

где $\frac{1}{T_и}$ - коэффициент пропорциональности, характеризующий скорость изменения выходного сигнала, выраженный через постоянную времени интегрирования $T_и$.

И-закон регулирования реализуется в интегральных регуляторах и применяется для регулирования малоинерционных объектов с малым временем запаздывания и с существенным самовыравниванием. Достоинством интегральных регуляторов является отсутствие статической ошибки.

Интегрирующее звено вводят в автоматический регулятор для повышения точности регулирования (устранения ошибки регулирования в установившемся режиме, уменьшения ошибки в динамических режимах).

Пропорционально-дифференциальный закон регулирования (самостоятельно дифференциальный закон не применяется) определяется уравнением:

$$y_{рег} = K_p(\delta(\tau) + T_д d\delta(\tau)/d\tau),$$

где $T_д$ – постоянная времени дифференцирования (времени предварения).

Введение в закон регулирования дифференциальной составляющей целесообразно при управлении объектами, которые обладают существенным запаздыванием, с тем, чтобы регулятор реагировал на само возмущение, а не на уже проявившееся отклонение выходной величины, и вырабатывал в начальные моменты регулирования большее воздействие на объект. Таким образом, дифференциальная составляющая вводит в алгоритм регулирования предваряющее (опережающее) воздействие. Оно обеспечивает

повышение быстродействия регулирования, но не исключает статическую ошибку.

В системах автоматизации часто применяется пропорционально-интегрально-дифференциальный закон (ПИД-закон) регулирования. Он получается сложением И-, П- и Д-законов. ПИД-алгоритм объединяет достоинства этих законов. Он позволяет значительно улучшить динамику процесса регулирования, особенно в объектах с частыми возмущениями.

При выборе регуляторов для инерционных объектов с запаздыванием учитывают следующее.

П-регуляторы используют, если по технологическим условиям допустимы либо большое время переходного процесса $\tau_{n.n}$, либо большая ошибка регулирования в установившемся режиме.

ПИ-регуляторы используют, если допустимо $\tau_{n.n} > 6\tau_{,}$.

ПИД-регуляторы обеспечивают $\tau_{n.n} = 4...6\tau_{,}$.

Дальнейшее сокращение $\tau_{n.n}$ до минимально возможного для таких объектов $\tau_{n.n} = 2\tau_{,}$ достигается использованием специальных регуляторов, включающих модель объекта с запаздыванием.

При применении для регулирования средств вычислительной техники, в частности регулирующих программируемых контроллеров, выбирается оптимальный закон (например, сочетание типовых законов) с точки зрения качества регулирования.

Кроме того, применяется *адаптивное* регулирование, когда коэффициент передачи регулятора изменяется в зависимости от сигнала рассогласования, значения регулируемой величины и её производной. Такое регулирование улучшает быстродействие или снижает динамическую ошибку системы регулирования.

Позиционное регулировании обычно применяется как двухпозиционное или трёхпозиционное.

Алгоритм двухпозиционного регулирования имеет вид:

$$y_{рег} = B \text{ при } \delta > 0;$$
$$y_{рег} = -B \text{ при } \delta < 0,$$

где B – регулирующее воздействие.

Например, при $\delta>0$ производится включение нагревателя, а при $\delta < 0$ – его выключение.

Двухпозиционное регулирование приводит к автоколебательному характеру процесса регулирования. Регулируемая величина совершает непрерывные колебания вокруг заданного значения.

Характеристиками автоколебательного процесса являются амплитуда колебаний и их период. Они зависят от динамических свойств объекта регулирования – его инерции и времени запаздывания.

При реализации трёхпозиционного закона выбираются значения регулирующего воздействия (максимум B, норма $B_н$ и минимум – B).

Алгоритм трехпозиционного регулирования имеет вид:

$$y_{рег} = B_н \text{ при } |\delta| < \Delta_н/2;$$
$$y_{рег} = B \text{ при } \delta \geq \Delta_н/2;$$
$$y_{рег} = -B \text{ при } \delta \leq -\Delta_н/2,$$

где $\Delta_н$ – зона нечувствительности.

Трехпозиционное регулирование обеспечивает меньшие амплитуды автоколебаний и более редкие переключения регулирующего органа, чем двухпозиционное, так как такой регулятор имеет устойчивое состояние $y_{рег} = 0$ в окрестностях равновесного состояния системы (в зоне нечувствительности).

Применение регулирования

Наиболее часто в литейном производстве регулирование применяется в процессах, связанных с управлением температурой.

Например, в системах автоматизации печей регулированию подлежат:

расход и давление газа;

процесс горения топлива (соотношения топливо – воздух);

давление в печи.

Все эти системы регулирования – системы стабилизации.

В старых системах (основанных на аналоговой технике) техническая реализация разных законов регулирования была затруднена. Выпускались различные регулирующие устройства для реализации разных законов регулирования. При этом руководствовались следующим.

Если в процессе допускаются остаточные отклонения регулируемой величины – применялся П-регулятор. Если нет, то применялись И-, ПИ-, ПИД-регуляторы. При допустимости колебаний регулируемой величины в некоторых пределах – позиционное (релейное) регулирование.

При использовании вычислительной техники (например, ПК) выбор закона регулирования во многом определяется характеристиками регулирующих органов. Если последние имеют непрерывные расходные характеристики (регулирующие клапаны, поворотные заслонки), то применяется

непрерывное регулирование, а конкретный закон регулирования (или их комбинация) может выполняться при наладке процесса, так как регулирующие ПК имеют в составе своего программного обеспечения программы для их реализации.

Помимо основных законов регулирования, современные регуляторы могут реализовывать *экстремальное* регулирование, то есть автоматический поиск экстремального (максимального или минимального) значения регулируемой величины. Необходимость такого регулирования поясним следующим примером.

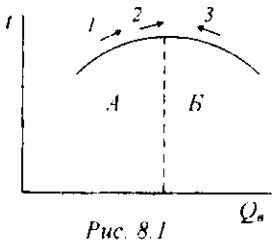


Рис. 8.1

Известно, что температура чугуна, выплавляемого в вагранке, зависит от расхода дутья, то есть количества воздуха, подаваемого в неё, причём зависимость эта нелинейна (рис. 8.1, где t – температура, $Q_в$ – расход воздуха). При малых расходах, когда кислорода не хватает для полного сгорания кокса, увеличение расхода приводит к повышению температуры чугуна (зона А). При большом расходе лишнее количество воздуха уносит с собой тепло, и увеличение расхода приводит к понижению температуры чугуна (зона Б).

Таким образом, температура чугуна на желобе вагранки имеет максимум при некотором значении расхода дутья. В то же время точка максимума зависит от множества случайных и неконтролируемых воздействий, и заранее определить оптимальный расход дутья невозможно. Для решения этой задачи раньше применялся специальный шаговый экстремальный регулятор, а сейчас – программа ПК. Они работают по следующему алгоритму (рис. 8.2).

С датчика температуры и таймера вводятся температура чугуна t и текущее время τ, затем выдается управляющее воздействие u на шаговый двигатель, который при этом поворачивает заслонку в воздухопроводе, увеличивая на небольшую величину ее проходное сечение F и подачу воздуха в вагранку $Q_в$. Затем реализуется задержка по времени $\tau_ц$, чтобы процесс плавки успел среагировать на введенное возмущение, и вновь опрашивается датчик температуры. Если температура повысилась, то следующий шаг делается в том же направлении (т.е. расход дутья увеличивается), если же она понизилась, то следующий шаг делается в обратном направлении.

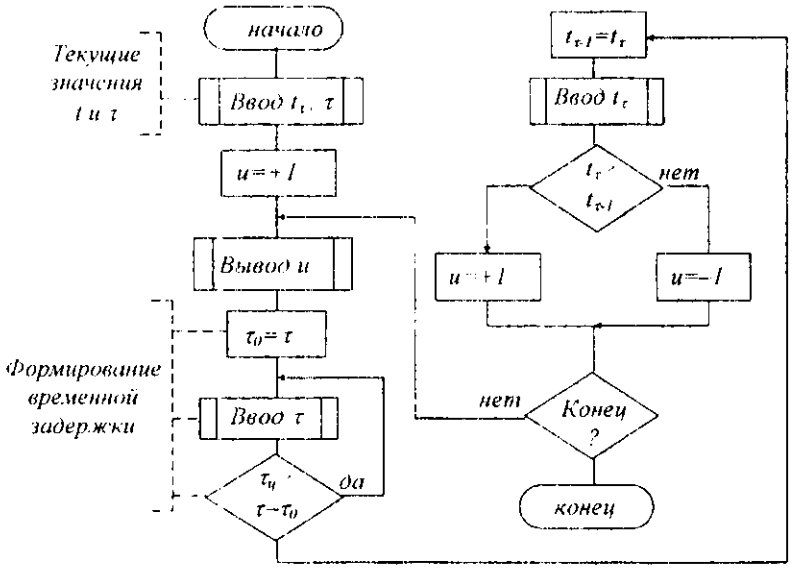


Рис. 8.2

Регулирование широко применяется для управления печами, для регулирования температуры модельных плит, стержневых ящиков, форм литья под давлением. Поскольку литейная оснастка представляет собой небольшие объекты, а требования к точности регулирования обычно не очень жёсткие, часто для них применяется позиционное регулирование с помощью запорной аппаратуры, более дешёвой по сравнению с регулирующей. Ниже приводятся два оригинальных решения реализации позиционного регулирования в литейных процессах, которые широко применялись в эпоху релейной и аналоговой техники.

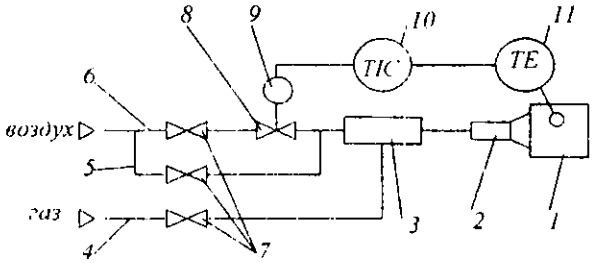
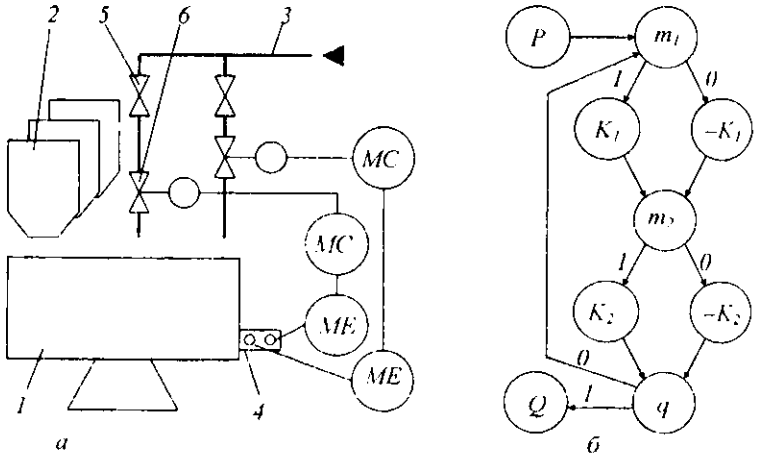


Рис. 8.3

На рис. 8.3 показана часть принципиальной схемы позиционного регулирования температуры стержневого ящика (на стержневой машине) при газовом нагреве. Стержневой ящик *1* нагревается газовой горелкой *2*. Газовоздушная смесь приготовляется в смесителе *3*, к которому поступает газ по трубопроводу *4* и воздух по трубопроводам *5* и *6*. Вентилями *7* настраивают расходы по отдельным трубопроводам так, чтобы при открытии всех трубопроводов тепловая мощность горелки была чуть больше, чем необходимо для поддержания требуемой температуры при нормальной работе стержневой машины и полном сгорании газа, а при закрытии трубопровода *6* – несколько меньше необходимой (вследствие недостатка воздуха и поэтому неполного сгорания газа). Управляет исполнительным механизмом *9* запорного клапана *8* позиционное регулирующее устройство *10* по сигналам датчика температуры *11*, открывая трубопровод 6 при температуре ниже заданной и закрывая его при температуре выше заданной.

На рис. 8.4 показано регулирование влажности в смесителе непрерывного действия, снабжённого датчиком формуемости (см. рис. 3.28). В смеситель *1* (рис. 8.4,а) подаются сыпучие компоненты из бункеров *2* и вода по трубопроводу *3*. Смеситель оборудован датчиком формуемости *4*. Вода в смеситель может подаваться по двум патрубкам. Расход воды в каждом патрубке устанавливается вентилями *5*, а управляется (включается и выключается) запорными клапанами *6*.



а *б*

Рис. 8.4

Исполнительные механизмы клапанов (соленоиды) управляются от реле *МС*. В свою очередь управление реле осуществляется посредством датчиков влажности (фотоэлементами) *МЕ*.

Расходы воды в патрубках подбираются следующим образом. Если смесь проходит через узкую щель датчика формуемости (то есть имеет очень низкую влажность), то через правый патрубок в смеситель подаётся большое количество воды. Если смесь не проходит через узкую щель, а через широкую проходит (то есть имеет средний уровень влажности), то через левый патрубок подаётся небольшое количество воды. Если же смесь не проходит через обе щели (то есть имеет очень высокую влажность), то вода вообще не подаётся.

На рис. 8.4,б приведен алгоритм работы релейной схемы, управляющей вводом воды. Схема начинает работать по команде *P*. Затем поочерёдно опрашиваются датчики влажности (фотоэлементы) m_1 и m_2. При сигнале *1* (ток есть) соответствующий клапан включается (команда K_i, $i=1,2$). В противном случае выдаётся команда «Выключить клапан» (команда $-K_i$, $i=1,2$). Затем проверяется требование закончить работу (условие q). При $q=0$ цикл повторяется. Система выключается командой *Q*.

§ 2. Программное управление

Программное управление реализуется путём выполнения определённой последовательности строго фиксированных операций, задаваемых циклограммой (программой). Программа может синхронизироваться как датчиками временных интервалов, так и внешними событиями.

Типичным примером программного управления является включение различных сложных или потребляющих большую мощность установок.

Установки непрерывного действия, транспортные системы, многодвигательные и энергоёмкие установки имеют некоторые особенности в своих циклограммах (см. рис. 1.8).

При включении (запуске) транспортной системы, состоящей из нескольких конвейеров или элеваторов, существует опасность, что при неожиданном отказе одного из них транспортируемый материал будет поступать к неработающему звену этой цепи. Это может вывести из строя всю систему, а материал (например, формовочную смесь, отливки или литники) придётся удалять вручную. Во избежание этого отдельные механизмы таких транспортных систем (конвейеры, элеваторы, перегрузочные механизмы) включаются в работу последовательно, начиная с конца цепочки, причём очередной транспортёр включается только после получения сигнала о нормальной работе следующего в транспортной цепочке механизмов. Последовательное включение двигателей системы необходимо также для сни-

жения максимальных токов в электрической сети, возникающих при включении электродвигателей. Выключаются транспортные системы также последовательно, но в обратном порядке, начиная с первых звеньев в цепочке.

Проходные дробемётные камеры являются сложными многодвигательными установками. Они транспортируют отливки, обрабатывают (собирают шнеками, поднимают элеваторами, просеивают) дробь. Кроме того, дробемётные аппараты (на одной камере их несколько) потребляют много электроэнергии, и одновременное их включение не допускается, поскольку это может понизить напряжение сети и вызвать аварийную остановку другого оборудования.

Приводы таких камер включаются также последовательно, с соблюдением правил включения транспортных систем. Включаются дробемётные аппараты поочередно, причём перед запуском каждого последующего необходимо выдержать время для разгона предыдущего аппарата и снижения больших пусковых токов.

Последовательное включение механизмов позволяет уменьшить пусковые моменты сопротивления (это также уменьшает пусковые токи). Так, включение мощных бегунов производится следующим образом. В чаше бегунов не должно быть смеси, а муфта, соединяющая электродвигатель бегунов с редуктором и катками (здесь обычно применяются пневматические муфты), выключена. При запуске бегунов сначала включается только один электродвигатель. После того как он набрал достаточно высокие обороты, включается муфта. Смесь начинает подаваться только после разгона всего механизма бегунов.

Циклограммы таких систем были представлены на рис. 1.8. Обычно в режиме наладки и ручного управления механизмы включаются отдельными пусковыми кнопками, а в автоматическом режиме (граф-схема алгоритма управления для этого режима показана на рис. 8.5) при получении команды на выполнение цикла Р после проверки условий $q_1 - q_n$, характеризующих исходное состояние системы. Система управления последовательно даёт команды на включение механизмов K_i $(i = 1, 2...)$ через заданные интервалы времени τ_i.

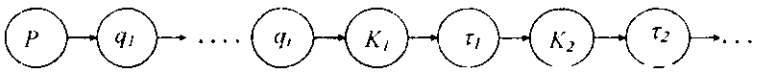


Рис 8.5

Примерно так же отключается транспортная система, начиная с первого механизма по ходу процесса. Выдержки времени должны быть достаточными для освобождения механизмов от транспортируемого материала.

Программное регулирование

В ряде случаев применяется программное регулирование процесса (например, при управлении пескомётами для набивки крупных форм, в машинах центробежного литья для изменения частоты вращения изложниц в разных фазах процесса).

Отверждение стержня из холоднотвердеющей смеси продувкой газообразного катализатора выполняется следующим образом. Доза жидкого катализатора испаряется в специальной подогреваемой камере. Через камеру с парами катализатора пропускается сжатый воздух, который затем проходит через стержень и вызывает отверждение связующего в нём. После отверждения стержень продувается большим количеством воздуха, чтобы удалить из него остатки катализатора.

Процесс продувки стержня может осуществляться двумя способами. По первому способу (кривая *1* на рис. 8.6) через камеру пропускается сжатый воздух под давлением p_1 = 0,5–1 ати в течение τ_1 = 2–5 с. Затем стержень продувается сжатым воздухом с давлением p_2 = 1,5–2,5 ати в течение τ_2 = 10–20 с. По второму способу (кривая *2* на рис. 8.6) через камеру пропускается сжатый воздух с давлением, плавно возрастающим от 0 до конечной величины, а затем при этом давлении продувка продолжается некоторое время.

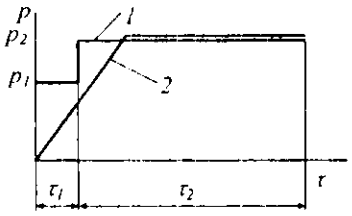


Рис. 8.6

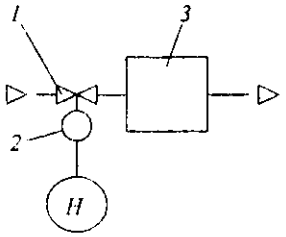


Рис. 8.7

Ступенчатый режим продувки (кривая *1*) легко реализуется средствами дискретной автоматики с использованием двух редукционных клапанов и двух реле времени.

Для продувки по второму варианту система управления должна включать (рис. 8.7) регулирующий клапан *1* с исполнительным механизмом *2*, которые пропускают сжатый воздух в камеру нагрева *3*, и за-

датчик H, который должен выдавать возрастающий во времени управляющий сигнал в соответствии с графиком на рис. 8.6.

Различные способы получения такого сигнала, используемые в системах управления с аналоговыми устройствами, показаны на рис. 8.8. На рис. 8.8,а изображена электрическая схема, использующая для получения управляющего сигнала заряд конденсатора C через резистор R. После подачи напряжения V_n в электрическую цепь напряжение на конденсаторе V возрастает от 0 до V_n (скорость роста напряжения зависит от величин C и R). Это напряжение может использоваться как управляющий сигнал для электрического исполнительного механизма на рис. 8.7.

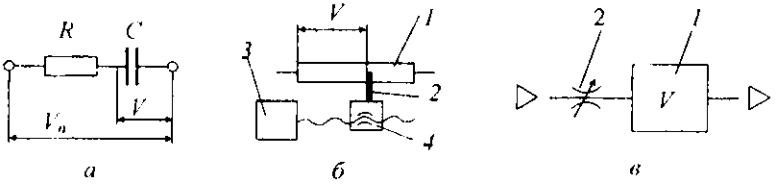


Рис. 8.8

Для управления достаточно крупными регулирующими устройствами применяются электрические исполнительные механизмы, включающие реостат, который может использоваться для контроля положения регулирующего органа или для программного управления им. Управляющий сигнал в виде напряжения V снимается с реостата *1* (рис. 8.8,б) подвижным контактом *2*, который перемещается вдоль реостата электродвигателем *3* с винтовой передачей *4*.

Задатчик с пневматическим выходным сигналом (рис. 8.8,в) представляет собой ёмкость *1*, в которую подаётся сжатый воздух из сети через регулируемый дроссель *2*. Давление в этой ёмкости и является управляющим сигналом.

Применяются также программные регуляторы, в которых закон регулирования задаётся вращением кулачка, имеющего соответствующий профиль.

Однако эти варианты достаточно неудобны и используются только в особых случаях. В литейном производстве чаще применялся ступенчатый (дискретный) режим.

При использовании вычислительной техники управляющий сигнал для регулирующего клапана может формироваться алгоритмом, показанным на рис. 8.9 (подробности пересчёта давления в величину выходного сигнала и работа с таймером опущены).

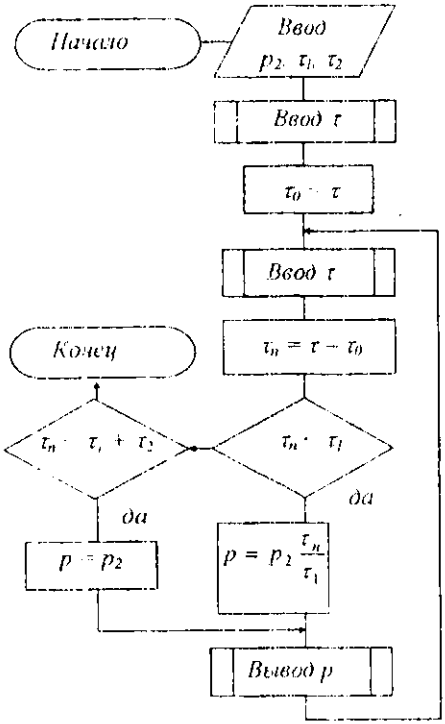


Рис. 8.9

В программу вводятся заданные значения τ_1, τ_2, и p_2. Запрашивается таймер, запоминается время начала процесса, затем в первой части процесса ($\tau_n < \tau_1$) периодически опрашивается таймер, рассчитывается и выводится на регулирующий клапан давление, пропорциональное прошедшему времени. Затем до окончания продувки на клапан выводится заданное давление.

Программное регулирование при управлении смесителем применяется в условиях единичного производства на одной из линий при изготовлении форм из ХТС на базе фурановой смолы для крупных чугунных отливок. Линия включает в себя смеситель непрерывного действия, вибростол, механизм протяжки и систему подачи модельных плит, а также установку для подачи в смеситель смолы и катализатора, датчики температуры песка, влажности и температуры окружающего воздуха.

В цехе применяется АСУ подготовки производства. Она, помимо прочего, готовит следующие данные для формовки каждой модели:

- содержание смолы в облицовочной и наполнительной смесях;
- требуемое время подачи в опоку облицовочной и наполнительной смесей;
- время уплотнения (вибрации опоки);
- время отверждения.

При поступлении на позицию формовки очередной модели оператор вводит в программируемый контроллер код модели, по которому тот получает от АСУ данные по этой модели.

ПК осуществляет программное управление смесителем и установкой для подачи в смесь смолы и катализатора, задаёт время уплотнения и отверждения формы. На рис. 8.10 показана часть алгоритма работы ПК, связанная с подачей смолы и катализатора (обозначено: $\tau_{об}$ и $\tau_{н}$ – время для выработки необходимого количества облицовочной и наполнительной смесей; $u_{об}$, $u_{н}$ и $u_{к}$ – уставки дозаторов смолы для облицовочной и наполнительной смеси и катализатора).

В ходе работы ПК получает с датчиков значения температуры песка, влажности и температуры воздуха. Расход катализатора зависит от температуры песка. Кроме того, возможен режим с плавным повышением содержания катализатора по высоте опоки, чтобы отверждение заканчивалось одновременно в нижней и верхней частях опоки. Если контролируемые параметры выходят за пределы допустимых значений, ПК включает сигнализацию и отключает смеситель.

Методом литья под давлением получают тонкостенные отливки. Чтобы металл не затвердевал в процессе заполнения формы, необходимо заполнять форму за очень короткое время. При этом скорость впуска металла в форму достигает десятков, а иногда превосходит 100 м/с. Чтобы получить такую скорость струи (скорость впуска), скорость поршня механизма прессования должна достигать 5–7 м/с.

При заполнении такой струёй полости формы, особенно её частей, удалённых от литника, скорость впуска не должна возрастать. В противном случае задняя часть струи, двигаясь быстрее передней, догоняет её и разбрызгивается, разрушается. Это приводит к появлению дефектов в отливке.

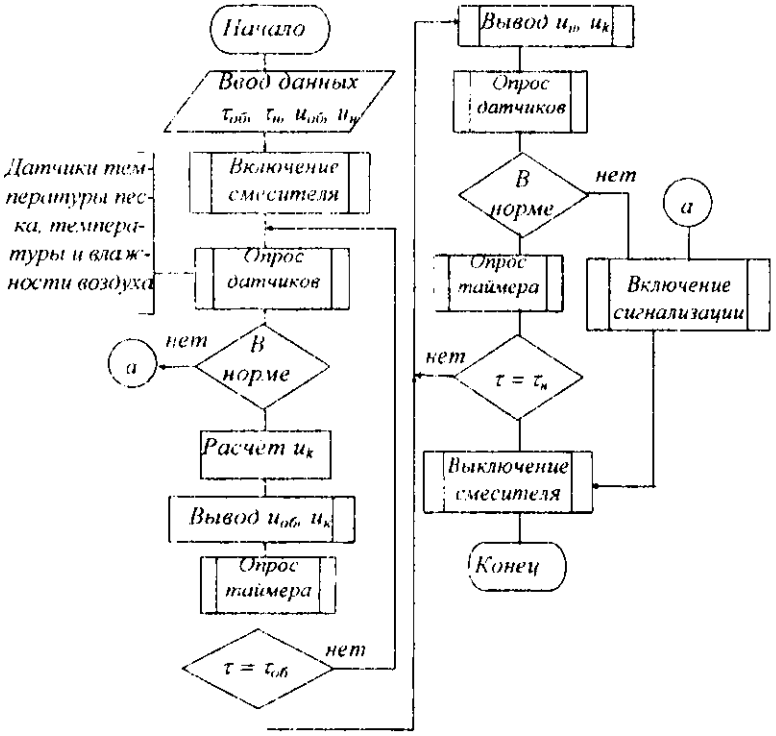


Рис. 8.10

После заполнения формы металлом давление в нём должно быстро подняться, для того чтобы сжать пустоты, заполненные газом (образовавшиеся при выделении газов из кристаллизующегося металла или смазки) или предотвратить такое выделение. Оптимальное давление позволит чётко оформить контуры отливки, компенсировать усадку быстро затвердевающего металла. Принято считать, что повышение давления должно происходить в пределах 0,01 с после заполнения.

В машине литья под давлением с горизонтальной камерой прессования последняя перед запрессовкой заполняется металлом примерно на ¾ своего объёма. Это делается для того, чтобы при движении прессующего поршня металл не выплёскивался из неё через заливочное отверстие, пока оно не перекрыто поршнем. Кроме того, для получения отливок разного веса для литейной машины предусмотрен ограниченный набор камер прессования различной ёмкости. В начале своего хода пор-

шень должен двигаться с небольшой скоростью, с тем чтобы металл не выплёскивался из заливочного отверстия, а воздух, находящийся над зеркалом металла в камере, удалялся из неё через литниковую систему и полость формы.

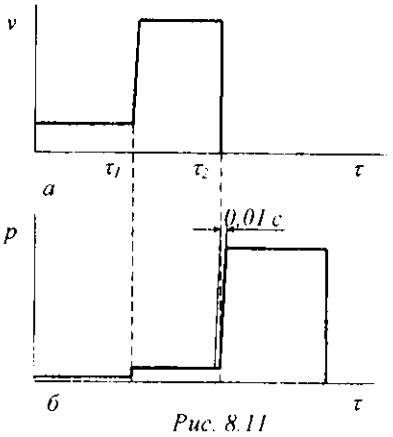


Рис. 8.11

Таким образом, оптимальный режим заполнения формы при литье под давлением (на машине с горизонтальной камерой прессования) представляется следующим (рис. 8.11,а – скорость поршня, б – давление на поршень в цилиндре прессования, τ – время). После заливки металла в камеру прессования поршень начинает двигаться с небольшой скоростью (его движение обеспечивается сравнительно невысоким давлением гидравлической жидкости в цилиндре прессования).

После перекрытия заливочного окна и вытеснения большей части воздуха из камеры прессования скорость поршня должна быстро возрасти до величины, при которой будет заполняться отливка. Когда вся отливка заполнится, давление на металл должно возрасти (то есть поршень механизма прессования должен выполнить «подпрессовку») для получения чёткого отпечатка отливки, компенсации усадки и сжатия газовых включений, которые могут оказаться в металле.

Механизм прессования, реализующий такой способ заливки, состоит из камеры прессования *1*, цилиндра прессования *2* и мультипликатора *3* (рис. 8.12). В исходном положении (поршни цилиндров в крайнем правом положении) распределитель прессования подаёт жидкость под давлением в трубопровод *4*, а трубопровод *5* соединён со сливом. В этом положении пневмогидравлический аккумулятор отключён от гидравлической сети машины.

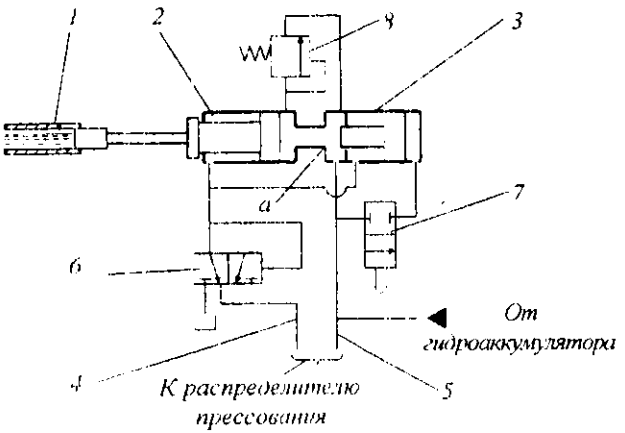


Рис. 8.12

По команде начала прессования распределитель переключается и подаёт жидкость под давлением в трубопровод *5*, а трубопровод *4* переключает на слив. Выполняется первая фаза прессования – движение прессующего поршня с низкой скоростью влево для вытеснения воздуха из камеры прессования. В этот период клапан слива *6* пропускает жидкость из штоковой полости цилиндра *2* на слив через распределитель прессования

В конце первой фазы прессования движущийся поршень нажимает на путевой переключатель (на схеме не показан), и соответствующий клапан открывает гидроаккумулятор. Последний выдаёт поток жидкости с большим расходом (при этом обратный клапан, установленный в гидросистеме, отключает показанную на рисунке часть гидросхемы от насосов), и прессующий поршень начинает двигаться с высокой скоростью, выполняя вторую фазу прессования – заполнение полости формы.

При высокой скорости прессующего поршня противодавление в его штоковой полости существенно возрастает. Для снижения величины противодавления (и существенного увеличения скорости поршня) в сливной магистрали установлен клапан слива *6*, который при возрастании противодавления переключается и направляет поток жидкости из штоковой полости напрямую на слив, минуя распределитель прессования.

В конце второй фазы поршень при помощи механической тяги переключает клапан *7*, и он начинает пропускать жидкость в правую полость цилиндра мультипликатора. Мультипликатор движется влево (площадь его поршня примерно в три раза больше площади штока). После того как торец штока мультипликатора достигнет точки *а* (см. рис. 8.12), правая полость прессующего поршня отделяется от гидравлической сети. Теперь жидкость подаётся только в правую полость мультипликатора. В соответствии с отношением площадей поршня и штока мультипликатора в полости штока (следовательно, в правой полости прессующего поршня) создаётся давление, примерно в три раза большее, чем давление, создаваемое насосами машины. Происходит третья фаза прессования – подпрессовка.

Для регулирования давления подпрессовки (его снижения по сравнению с максимально достижимым) поршневая полость рессующего поршня соединена с напорной магистралью переливным клапаном 8. Он открывается при превышении давления в этой полости выше давления настройки клапана, и таким образом поддерживает заданное этим клапаном давление подпрессовки.

Вся программа управления режимом заливки в этой схеме основана на путевой автоматике (конечный выключатель и двухпозиционный распределитель). Известны также конструктивные решения, в которых включение подпрессовки выполняется по времени или давлению.

Несмотря на высокую эффективность такого механизма (с его помощью было освоено большое количество сложных и несущих значительные нагрузки отливок), надёжность его работы оставляла желать лучшего. При производстве сложных отливок имел место брак по газовой и усадочной пористости.

Причины появления такого брака кроются в следующем.

1. Резкое повышение скорости движения поршня (при переходе ко второму этапу запрессовки) при наличии воздуха в камере прессования приводит к появлению волны жидкого металла перед движущимся поршнем, которая захватывает воздух. Это способствует образованию раковин в отливке.

2. Резкая остановка движущихся масс жидкого металла, прессового поршня и движущей его гидравлической жидкости в момент окончания заполнения приводит к гидравлическому удару. Возникающие при этом колебания давления в жидком металле могут привести к выделению из металла растворённых в нём газов и образованию газовой пористости.

3. Колебания порции жидкого металла, залитого в камеру прессования, приводят к изменению положения прессового поршня, в котором следует включить очередную фазу прессования.

Попытки устранить дефекты, возникающие в процессе, породили большое количество конструктивных и технологических решений.

Одним из наиболее радикальных решений является появление машин вертикальной компоновки. Эта машина имеет вертикальную камеру прессования, из которой жидкий металл выталкивается вверх в расположенную над ней форму (обычно с горизонтальным разъёмом). Здесь устраняется возможность захвата воздуха в камере прессования. Конструкторы этой машины указывают на эффективную ликвидацию усадочной и газовой пористости металла.

Более простое решение – это технологический приём, направленный на устранение захвата воздуха в камере прессования, заключается в том, что литниковый ход, соединяющий камеру прессования с полостью отливки, начинается не в верхней, а в нижней части камеры прессования. При этом воздух, который может быть захвачен металлом в камере, попадёт в отливку в самую последнюю очередь или останется в пресс-остатке.

Для машин с горизонтальной камерой прессования разработаны различные конструкции механизмов прессования, устраняющие основные причины появления указанных дефектов. Для устранения влияния гидравлического удара применяются механизмы с уменьшенной массой движущихся частей механизма, с уменьшенной массой движущейся жидкости, со специальными емкостями, принимающими жидкость при гидравлическом ударе во время резкой остановки поршня после заполнения полости формы. Кроме того, вместо клапана последовательности на сливе (поз. *6* на рис. 8.12) ставятся гидравлические регулирующие клапаны, предназначенные для изменения скорости прессующего поршня в ходе заполнения формы.

Так, в одной из схем сложный профиль графика скорости прессующего поршня достигается установкой на магистрали слива гидравлической жидкости из прессующего поршня (вместо клапана слива *6* на рис. 8.12) быстродействующего дросселирующего регулирующего клапана с гидравлическим усилителем мощности (см. рис. 4.4). Он позволяет получить 8 различных программируемых фаз скорости, изменив положение золотника. При отклонении положения золотника от заданного производится корректировка управляющего воздействия на золотник. Таким образом, клапан имеет собственную систему регулирования положения золотника. Управление клапаном осуществляется системой управления литейной машиной. Такой спо-

соб регулирования скорости запрессовки называется регулированием в режиме реального времени.

Программа перемещения золотника клапана вводится в ПК с монитора управляющего контроллера. Результат – графики скорости и давления, полученные при реализации заданного режима, – выводится на монитор. Это позволяет быстро скорректировать составляемую программу.

Такое гибкое управление скоростью и давлением при запрессовке позволяет:

- установить оптимальный график скорости и давления;
- смягчить удары поршня в конце хода прессования, в связи с чем ликвидируется облой на разъёме формы, уменьшается износ форм;
- получить высокую воспроизводимость процесса запрессовки, что существенно снижает брак отливок;
- выполнить бесступенчатый переход от одной фазы запрессовки до другой.

§ 3. Сглаживание возмущающих воздействий. Регулирование по возмущению

Значительные возмущающие воздействия затрудняют или делают невозможным получение требуемых результатов регулирования процесса. Одним из методов преодоления таких затруднений является устранение или значительное снижение наиболее сильных возмущений.

Устраняются возмущения специальным оборудованием или системой управления.

Значительные возмущения происходят в системе приготовления смеси. Причин тому несколько.

Формовочная смесь используется многократно (введённые в неё материалы совершают до 50 циклов до вывода из обращения), поэтому в ней накапливаются возникающие изменения. В то же время большое количество смеси, находящейся в системе, невозможно собрать в одной установке и там её перемешать.

В оборотной смеси, возвращающейся с выбивки, содержатся потоки смеси из незалитых форм, потоки просыпей и технологических излишков смеси. Их поступление неравномерно.

Смена изготавливаемых на линии отливок приводит к изменению отношения массы отливок к массе смеси в форме. Особенно значительное изменение этого соотношения происходит при смене отливок, полу-

чаемых с большим количеством стержней, на отливки бесстержневые и наоборот.

Всё это приводит к изменению соотношений между компонентами смеси (зерновой основы, мелких частиц, активной глины и добавок). Контроль состава смеси очень сложен и обычно выполняется лабораторными методами.

Кроме того, свойства смеси после её увлажнения изменяются в течение некоторого времени. Это связано с процессом набухания бентонита. При продувке пересохшей смеси для её охлаждения из смеси выдуваются очень ценные компоненты (которые затем, если в процессе смешивания используется вентиляторный шлам, возвращаются с ним в смесь).

По этим причинам сглаживание возмущений особенно актуально в процессах приготовления формовочной смеси.

Можно выделить методы стабилизации состава, стабилизации влажности и температуры смеси.

Для выравнивания состава смеси применяются специальные выбивные барабаны и гомогенизаторы. Последние представляют собой барабаны с наклонной осью вращения. В гомогенизатор смесь поступает с ленточного транспортёра. В нём она перемешивается и увлажняется. Перемешанная в гомогенизаторе смесь просыпается на другой транспортёр, передающий её в следующий агрегат, например в установку испарительного охлаждения. Однако ёмкость гомогенизатора (порядка 400 кг) позволяет усреднить состав смеси только в одной или двух полуформах и устранить только те неравномерности её состава, которые возникают из-за изменений в слое формы у её рабочей поверхности при заливке (разрушение бентонита, выгорание антипригарных и пластифицирующих добавок). Других неравномерностей, кроме перечисленных, гомогенизаторы не устраняют. Примерно так же усредняют смесь и барабаны.

Одним из кардинальных решений по устранению неравномерных воздействий на смесь (главные из них – наличие смеси из незалитых форм) является применение специальных транспортных систем для смеси. Наиболее очевидное решение – разделить эти потоки и использовать при дозировании отдельно, с учётом их состава (рис. 8.13,а). Потоки смеси из незалитых форм и просыпи собираются в отдельный бункер и из него по отдельной системе транспортёров передаются на участок приготовления смеси. Однако при таком решении может возникнуть ряд трудностей, связанных с конструкцией оборудования и установкой дополнительной системы транспортёров на участок приготовления смеси.

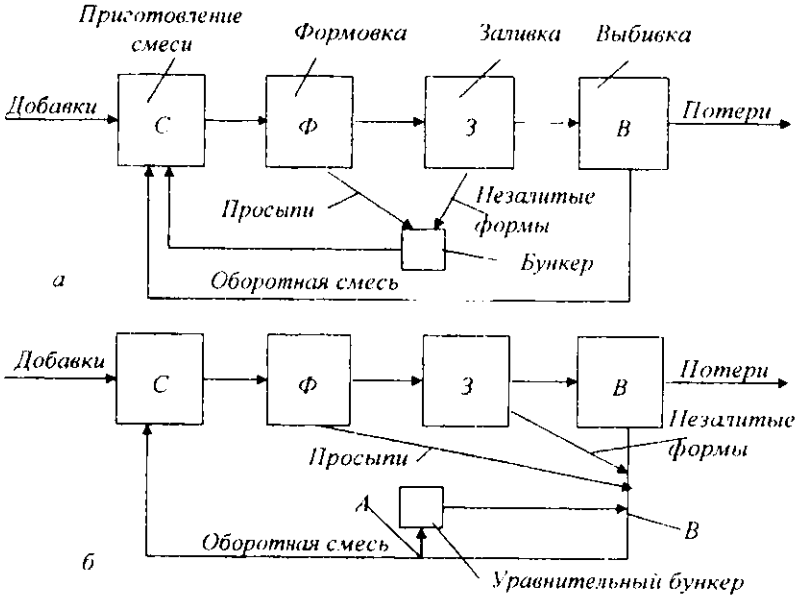


Рис. 8.13

Альтернативное решение – на рис. 8.13,б. Вся смесь поступает в транспортную систему оборотной смеси. Но в какой-то точке *А* этой системы одна треть этой смеси снимается с транспортёра и направляется в уравнительный бункер. Пройдя через бункер, смесь возвращается в систему транспорта оборотной смеси в точке *В*, которая расположена на значительном расстоянии от точки *А* снятия её с транспортёра. Таким образом, если в точках *А* и *В* смесь одинаковая (или из залитых, или из незалитых форм), то выравнивание состава не происходит. Однако если в одной из этих точек находится смесь из залитых форм, а в другой – из незалитых, то можно говорить о частичном выравнивании её состава. Работа этой системы напоминает работу очень большого гомогенизатора, в который помещается смесь из нескольких форм.

Известен ещё один вариант решения этой задачи – провести управление по возмущению.

Идея управления по возмущению заключается в следующем.

Возмущение измеряется датчиком возмущения на входе в объект управления. Сигнал от него поступает в систему управления и используется для изменения управляющего воздействия на объект. В данном случае при поступлении на переработку смеси с изменённым составом следует изменить соотношение компонентов смеси.

На рис. 8.14 представлена часть алгоритма управления дозаторами смесителей.

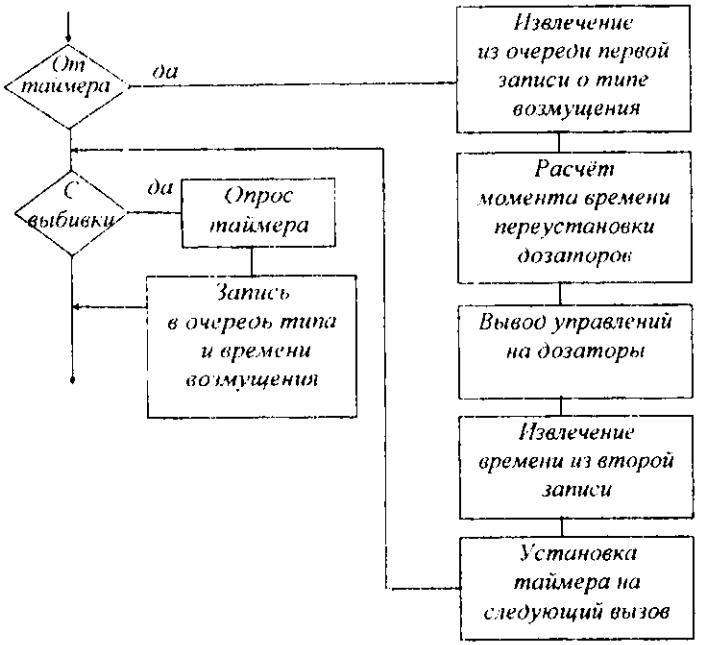


Рис. 8.14

Показано действие прерываний, поступающих в управляющую программу от таймера и с датчика выбивки, фиксирующего очередное возмущение — выбивку незалитой формы или формы с большим количеством стержней.

Данные о типе возмущений и времени их возникновения хранятся в очереди[2], с которой работает программа. Новая запись включается в конец очереди. Первая запись в очереди содержит информацию о возмущении, ближайшем к смесителю. При возникновении очередного возмущения в потоке оборотной смеси датчик выбивки вызывает прерывание основной программы. Программа опрашивает датчики на выбивке и таймер, затем включает эти данные в конец очереди.

Когда оборотная смесь с первым зафиксированным возмущением достигает смеситель, заранее установленный на это время таймер вызывает прерывание в основной программе. По этому сигналу программа извлекает из первой записи очереди данные о типе возмущения, рассчитывает необходимые переустановки дозаторов смесителя и время работы при этих установках, выдаёт команды на регулирующие органы дозаторов. Затем из второй записи она получает время следующего возмущения и устанавливает таймер для следующего прерывания. В дальнейшем программа контролирует время работы дозаторов с изменёнными установками и по истечении необходимого времени восстанавливает первоначальные установки.

Примером регулирования по возмущению является изображенная на рис. 8.15 система регулирования влажности формовочной смеси в бегунах, называемая также системой предварительной калькуляции (СПК). Она измеряет влажность и температуру отработанной смеси, поступающей в смеситель, и корректирует по этим данным количество подаваемой воды.

[2] Очередь – список данных (записей), в котором первым считывается элемент, записанный первым (термин вычислительной техники).

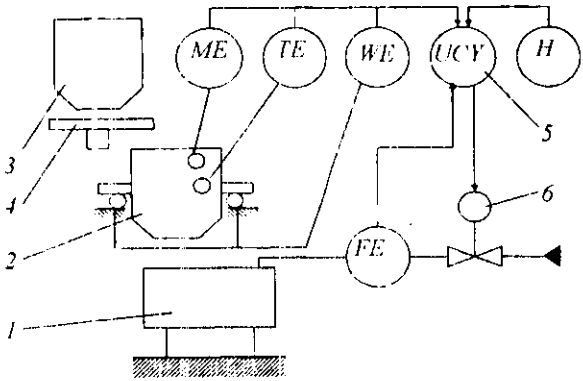


Рис. 8.15

На рис. 8.15 смеситель *1* загружается оборотной смесью из весового дозирующего бункера *2*, в который подаётся смесь из расходного бункера *3* дисковым питателем *4*.

В программируемый контроллер *5* поступают сигналы с датчиков влажности *ME* и температуры смеси *TE*, установленных в весовом бункере, а также с датчика веса смеси в этом бункере *WE*. Контроллер рассчитывает необходимое количество воды в соответствии с требуемой влажностью, указываемой задатчиком *H*, и управляет запорным клапаном *6*, подающим воду в смеситель, определяя её количество по показаниям расходомера *FE*.

Количество воды, необходимое для получения требуемой влажности смеси с учётом исходной влажности компонентов и её потерь за счёт испарения при транспортировке на формовку, может быть рассчитано следующим образом. Рисунок 8.16 отображает изменение влажности смеси в процессе её приготовления и транспортировки на формовку. В смеситель она поступает с влажностью W_o, а выходит из него с влажностью W_c. Затем смесь движется по транспортёрам к участку формовки, при этом охлаждаясь и испаряя влагу. На формовку смесь приходит с влажностью $W_ф$.

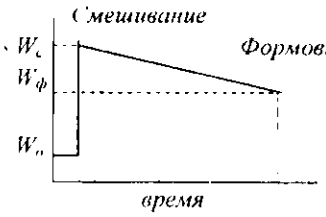


Рис. 8.16

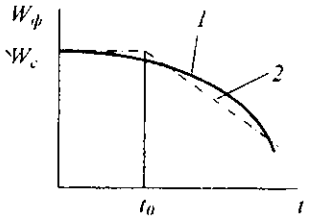


Рис. 8.17

Количество воды Q, которое необходимо подать в смеситель, рассчитывается по формуле:

$$Q = \left(W_c \sum_{i=1}^{n} m_i - \sum_{i=1}^{n} W_i m_i \right) 100,$$

где W_c – заданная влажность, % по массе;

m_i – масса компонентов;

W_i – влажность компонентов, % по массе.

Потери на испарение определяются с помощью экспериментального графика *1* (рис. 8.17), который показывает влияние температуры смеси (при выходе из смесителя) на её влажность на участке формовки. Исходная (сразу после приготовления) влажность смеси обозначена W_c.

Экспериментальная кривая *1 линеаризуется* кривой *2*, которую можно описать формулой:

$$W_ф = W_c - k\,(t \quad t_0),$$

где $W_ф$, W_c – влажность смеси на формовке и на выходе смесителя соответственно;

t – температура смеси на выходе из смесителя;

t_0 ~35^{0}C – по опытным данным;

k – коэффициент, определяемый по графику *2*; при $t < t_0$ $k = 0$.

Используя формулу, можно определить требуемое значение W_c по заданной влажности смеси на формовке $W_ф$.

При применении автоматических приборов для определения свойств формовочной смеси коррекция на потерю влаги при транспортировке может вноситься автоматически, если такой прибор ставится рядом с формовочной машиной.

§ 4. Логическое управление (загрузка бункеров)

Задачи логического управления решаются наиболее простыми *логическими* программируемыми контроллерами. До их появления с этой

целью использовались электрические (контактные и бесконтактные) и пневматические схемы дискретной автоматики.

Некоторые примеры применения логического дискретного управления приводились при описании управления циклограммами. Здесь рассмотрен пример несколько иного рода. Система управления не реализует заданную последовательность действий, а постоянно контролирует существующую ситуацию (проверяя сигналы датчиков), и в зависимости от нее производит управляющие воздействия.

На рис. 8.18 приведена схема автоматической формовочной линии: два формовочных автомата *1*, бункеры для смеси *2* (над автоматами *Б 1* и *Б 2* и бункер для излишков смеси *Б 3*, из которого неиспользованная смесь возвращается в систему приготовления смеси). Над бункерами расположен ленточный транспортер *3* – (на рис. 8.18,а показан его вид сверху) с тремя плужками *4 (П 1 – П 3)*, которые при опускании на транспортер сбрасывают с него смесь в расположенные ниже бункеры. Причем плужок *П 3* имеет посередине щель, поэтому он пропускает часть смеси в следующий бункер. Приводы плужков *5* включают асинхронный электродвигатель, редуктор и винтовую передачу. Они поднимают или опускают соответствующие плужки. Каждый двигатель управляется двумя контакторами, один из которых включается для опускания плужка вниз (Н), а другой – для подъема вверх (В).

Сигналы на опускание или подъем плужков вырабатываются от уровнемеров *6* (LE 1 – LE 4), контролирующих верхние и нижние уровни смеси в бункерах *Б 1 и Б 2*. Уровнемеры при наличии смеси вырабатывают логические сигналы (*1* – есть смесь и *0* – нет смеси в месте их установки в бункере).

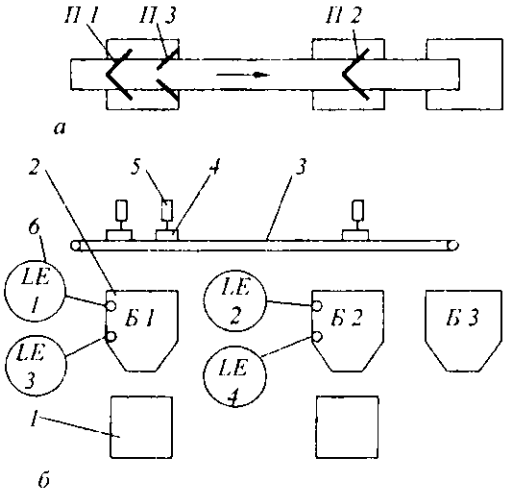


Рис. 8.18

Задачу логического управления плужками удобно записать в виде таблицы соответствий (табл. 8.1), в которой указывается, какое положение (нижнее – Н или верхнее – В) должен принять каждый плужок при срабатывании тех или иных уровнемеров, или какой контактор соответствующего уровнемера следует включить.

Таблица 8.1

Режим	Сигналы уровнемеров				Положение плужков		
	LE 1	LE 3	LE 2	LE 4	П 1	П 3	П 2
1	0	0	0	0	В	Н	Н
2	0	1	0	0	В	В	Н
3	0	0	0	1	Н	В	В
4	0	1	0	1	В	Н	Н
5	0	1	1	1	Н	В	В
6	1	1	0	1	В	В	Н
7	1	1	1	1	В	В	В
8	0	0	1	1	Н	В	В
9	1	1	0	0	В	В	Н

Рассмотрим различные ситуации, которые могут иметь место при работе системы подачи смеси.

Если оба бункера (*Б 1* и *Б 2*) пусты и все уровнемеры дают сигнал 0 (режим *1*), следует заполнять оба бункера, для чего опустить *П 2* и *П 3* и поднять *П 1*.

Если один из нижних уровнемеров (*LE 3* или *LE 4*, режимы *2* и *3*) показал наличие смеси, то для ускорения заполнения другого бункера весь поток смеси направим в последний, для чего опустим плужок *П 1* или *П 2* над ним и поднимем остальные плужки.

Если оба нижних уровнемера (*LE 3* и *LE 4*) показали наличие смеси (режим *4*), будем заполнять оба бункера, для чего следует опустить *П 2* и *П 3* и поднять *П 1*.

Если один из верхних уровнемеров (*LE 1* или *LE 2*, режимы *5* и *6*) показал наличие смеси, то прекратим заполнение соответствующего бункера, оставив в нижнем положении плужок *П 2* или *П 1* и подняв остальные. Так же поступим, если один бункер пуст, а другой полон (режимы *8* и *9*). Наконец, если оба бункера полные, поднимем все плужки (режим *7*).

В итоге получим таблицу соответствий, отражающую возможные производственные ситуации при исправной работе системы. Другие возможные комбинации сигналов уровнемеров показывают наличие неисправностей в системе, например если какой-либо из верхних уровнемеров будет показывать наличие смеси, а соответствующий нижний – ее отсутствие.

Полученная таблица соответствий представляет логическую функцию для каждого плужка, входными значениями которой являются сигналы уровнемеров, а выходными – положения плужка (точнее, управляющих ими контакторов). Задачей формирования логического управления для каждого плужка теперь является подбор таких комбинаций сигналов уровнемеров, которые выполняли бы заданную логическую функцию. При использовании для управления элементов дискретной автоматики (релейных контактных или бесконтактных электрических элементов или элементов пневмоавтоматики) поставленная задача решается с использованием методов математической логики (методами синтеза комбинационных и конечных автоматов).

Если же управление осуществляет программируемый контроллер, то управляющая программа должна после получения сигналов уровнемеров и присвоения своим переменным *LE 1* – *LE 4* (для упрощения понимания программы они обозначены так же, как и сами уровнемеры) соответствующих значений проверить их на соответствие режимам, указанным в таблице 8.1. Для примера на рис. 8.19 показана такая проверка для режима 5. После определения существующего в данный момент режима следует выполнить требуемые установки плужков.

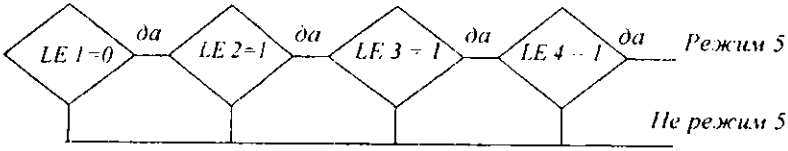


Рис. 8.19

В целом алгоритм программы ПК для управления загрузкой бункеров может иметь вид, представленный на рис. 8.20.

В начале работы программы производится опрос уровнемеров *LE 1 – LE 4*. Затем устанавливается номер режима по таблице 8.1, соответствующий показаниям уровнемеров.

Если их показания не соответствуют ни одной из комбинаций, предусмотренных в таблице 8.1 (а это возможно, если один из верхних уровнемеров показывает наличие смеси, а нижний уровнемер этого же бункера показывает отсутствие смеси), очевидно, имеется неисправность, о чем подается соответствующий сигнал. Следует устранить неисправность или перейти на ручное управление. В противном случае подаются команды на установку плужков в положения, предусмотренные в таблице 8.1. Если не поступила команда на окончание работы, повторяется опрос уровнемеров и работа программы продолжается.

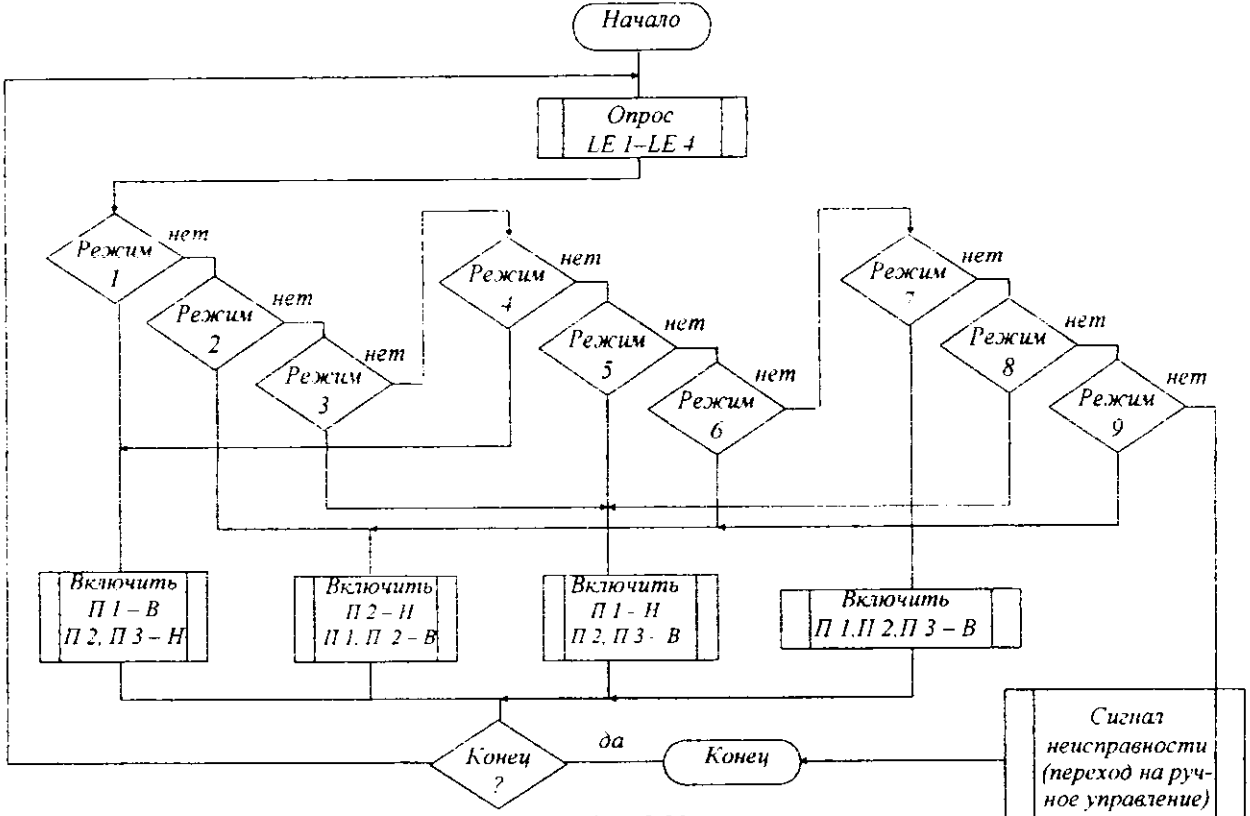

Начало
Опрос
LE 1–LE 4
Режим 1
нет
Режим 2
нет
Режим 3
нет
Режим 4
нет
Режим 5
нет
Режим 6
нет
Режим 7
нет
Режим 8
нет
Режим 9
нет
Включить
П 1 – В
П 2, П 3 – Н
Включить
П 2 – Н
П 1, П 2 – В
Включить
П 1 - Н
П 2, П 3 - В
Включить
П 1.П 2.П 3 – В
Конец ?
да
Конец
Сигнал неисправности (переход на руч-ное управление)

Рис. 8.20

§ 5. Дозирование

Задача дозирования – отделить от массы дозируемого материала заданное его количество. Дозирование применяется при приготовлении формовочных и стержневых смесей, загрузке шихты в плавильные печи, подаче материалов в формовочные и стержневые машины, смазке форм и в других случаях. Различают дозирование сыпучих, кусковых материалов, жидкостей. Существуют задачи дозирования очень больших или очень малых количеств материала, дозирования связных материалов (когда отдельные их куски трудно отделяются друг от друга), дозирования вязких жидкостей.

Применяется дозирование по весу (по массе), по объёму, по времени. При этом, как правило, требуется дозировать именно заданную массу материала.

Существенно, что на плотность сыпучего материала (насыпную массу) влияет его влажность, и если влажность такого материала нестабильна, возникает дополнительная погрешность дозирования.

Дозирование с промежуточной ёмкостью

На рис. 8.21,а показана простейшая схема дозирования сыпучих материалов по весу (дозирование с промежуточной ёмкостью). Обозначено: *1* – бункер с дозируемым материалом, *2* – ленточный питатель, *3* – привод ленточного питателя, *4* – весовой бункер, опирающийся на датчики веса, *5* – шиберный затвор весового бункера со своим приводом, *WE* – датчик веса, *WIC* – прибор для измерения веса, показывающий и регулирующий (с встроенным устройством для выдачи управляющих сигналов), *H* – задатчик дозы, *NS* – контактор.

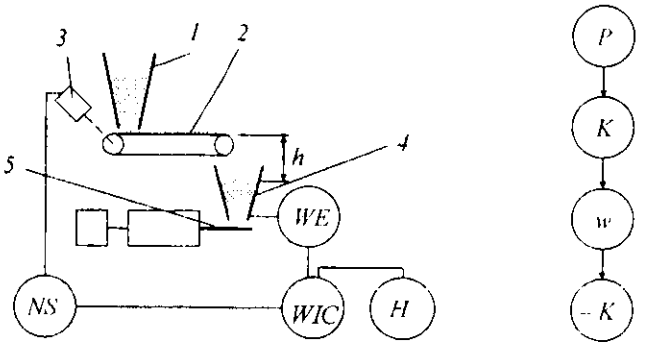


Рис. 8.21

Датчик веса *WE* подаёт сигнал о текущем весе материала в весовом бункере в прибор *WIC*, тот сравнивает текущий вес с заданным на задатчике *H* и при их равенстве или превышении первого над вторым выдаёт управляющий сигнал $w = 1$ (например, замыкает управляющий контакт).

Схема алгоритма управления дозированием представлена на рис. 8.21,б. По команде *P* начинается процесс дозирования. Командой *K* включается привод ленточного питателя (и дозируемый материал начинает поступать в весовой бункер). Затем опрашивается значение управляющего сигнала *w* измерительного прибора. Пока заданный вес не набран ($w = 0$), процесс дозирования продолжается. При $w = 1$ привод питателя отключается командой *–K*. Заданный вес набран. Дозирование закончено.

На точность дозы, помимо других факторов, влияет «переходная» масса, уже сошедшая с питателя, но ещё не попавшая в весовой бункер (в струе высотой *h* на рис. 8.21). Если расход материала через питатель постоянный, в задание на величину дозы можно ввести поправку на эту переходную массу. В противном случае появляется дополнительная погрешность точности дозы.

Дозирование по весу без промежуточной ёмкости

Дозирование по весу без промежуточной ёмкости основывается на измерении расхода материала, описанного в §2 «Измерение основных механических и физических величин» главы 3. На рис. 3.19, 3.20 приведены функциональная схема и алгоритм расчёта расхода.

Для организации дозирования алгоритм должен быть дополнен операцией интегрирования расхода по времени с момента начала дозирования и операцией вывода команды на прекращение дозирования (выключения ленточного питателя), а функциональная схема – задатчиком для установки требуемой дозы.

Дозирование без промежуточной ёмкости значительно сокращает размеры установки дозирования по высоте, что оказывается иногда существенно в конкретных условиях производства.

Дозирование с выбором ведущего компонента

Принцип управления дозированием с выбором ведущего компонента может применяться как при получении отдельных доз материала, так и при регулировании соотношения расходов (при непрерывных процессах).

При непрерывном дозировании компонентов смеси, подаваемых в смеситель, необходимо соблюдать заданное рецептурой отношение между компонентами смеси. Для этого применяются системы *связанного управления дозированием* компонентов, при которых один компонент принимается за ведущий. Задача регулирования расхода этого компонента заключается в его стабилизации, а расходы других компонентов регулируются в зависимости от действительного расхода ведущего компонента (с целью обеспечения заданного отношения). В качестве ведущего компонента принимается оборотная смесь, так как различные производственные факторы обычно вызывают значительные колебания её расхода. Связное управление дозированием хорошо реализуется вычислительным устройством. Пример простейшего алгоритма для двух компонентов (ведущего и одного ведомого) приведен на рис. 8.22.

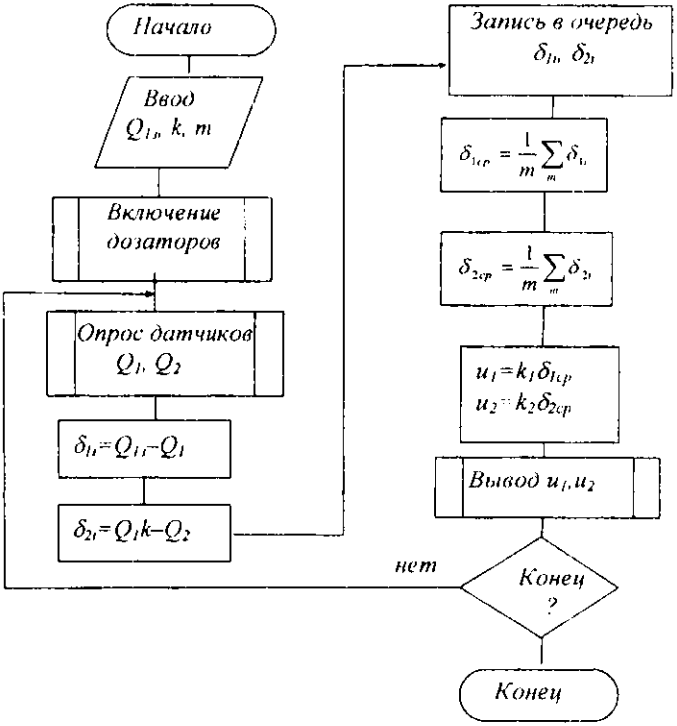


Рис. 8.22

На рис. 8.22 обозначено: $Q_{1З}$ – заданный расход ведущего компонента; Q_1, Q_2 – фактические расходы ведущего и ведомого компонентов; k – заданное отношение между ними; m – количество циклов измерений, на которых подсчитываются скользящие среднеарифметические погрешности расходов. Связное управление расходами компонентов осуществляется на основе усреднения нескольких m измерений расходов ведущего и ведомого компонентов.

Программа периодически опрашивает датчики расхода компонентов и вычисляет их текущие погрешности δ_{1i}, δ_{2i} (для ведущего компонента – по сравнению с заданным расходом, а для ведомого – по сравнению с заданным отношением к фактическому расходу ведущего компонента). Их значения записываются в данные очереди длиной m, причём при включении в очередь новой записи самая старая запись из нее удаляется. Затем подсчитываются скользящие средние погрешности, определяются необходимые управляющие воздействия (здесь они приняты пропорциональными найденным средним погрешностям), и последние выводятся на дозаторы.

Компенсационный способ (учёт предыдущей дозы)

Особенностью некоторых компонентов металлической шихты (литников, вообще возврата, металлического лома) является его большая связность – куски металла трудно отделить друг от друга. Такой лом полагается разделывать на шихтовом дворе при помощи ножниц, прессов, газовой резки. Тем не менее, такая проблема в большей или меньшей степени остаётся, и иногда трудно получить достаточно точную дозу.

Компенсационный способ дозирования позволяет достаточно успешно решить эту задачу, используя некоторые особенности литейных агрегатов. Плавильные печи, смесители, установки для переработки формовочных материалов часто усредняют состав загруженных в них материалов. Тогда, если загрузка производится небольшими (сравнительно с ёмкостью агрегата) порциями, а точное дозирование из-за свойств материала или особенностей процесса затруднено, то применяется компенсационный способ дозирования, при котором управляющее устройство запоминает погрешность каждого цикла дозирования и изменяет на эту величину задание для последующего цикла. Алгоритм работы такого устройства следующий:

$$P_n = P_з - (P_{i-1} - P_{(i-1)}),$$

где $P_з$ – заданная средняя масса дозы;

P_n – задаваемая масса в очередном цикле;

P_{i-1} и $P_{зад.\,i}$ – полученная и заданная масса в предыдущем цикле.

Это позволяет существенно повысить точность средней дозы.

Дозирование жидкостей

Дозирование жидкостей можно производить по весу, объёму или по времени. Однако, если плотность жидкости достаточно стабильна (она или мало зависит от температуры, или температура постоянна), применяется дозирование по объёму.

На рис. 8.23 изображено дозирование с помощью шестерёнчатого насоса. Обозначено: *1* – шестерёнчатый насос; *2* – электродвигатель насоса; *FE* – индукционный расходомер: *FI* – прибор для измерения расхода, показывающий; *FQC* – прибор для измерения расхода, интегрирующий и регулирующий (с встроенным устройством для выдачи управляющих сигналов); *H* – задатчик дозы; *NS* – контактор электродвигателя.

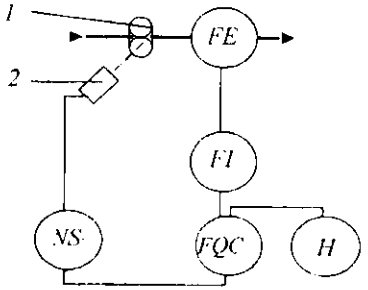


Рис 8.23

Дозирование малых количеств жидкостей может выполняться при помощи плунжерного насоса. Схема такого дозирования показана на рис. 8.24. В этой схеме не производится контроль полученной дозы, так как она обеспечивает требуемую точность дозирования (~ 0,5%).

Насос *1* приводится в движение пневмоцилиндром *2* с распределителем *3*. При возвратно поступательных ходах штока цилиндра (и соответственно плунжера насоса) жидкость с помощью обратных клапанов *4* перекачивается из трубопровода *5* в трубопровод *6*. Величина дозы определяется числом ходов плунжера. Управление пневмоцилиндром осуществляется командным электрическим прибором *KS*, который выдаёт управляющие сигналы (включение и выключение соленоида распределителя 3) через заданные промежутки времени до тех пор, пока реле счёта импульсов *EC* не подаст сигнал на прекращение работы *KS* при достижении числа ходов, установленного на задатчике *H*. Алгоритм

управления дозированием показан на рис. 8.24,б, где *Р* – команда на дозирование; *К* и *–К* – команды на включение и выключение селеноида; *τ* – время, отводимое на движение поршня пневмоцилиндра; *С* – команда от *ЕС* на прекращение дозирования. В настоящее время для такого управления обычно используются программируемые контроллеры, одна из программ которого реализует алгоритм, показанный на рис. 8.24,б. Контроллер выполняет также функции задатчика и реле *ЕС*.

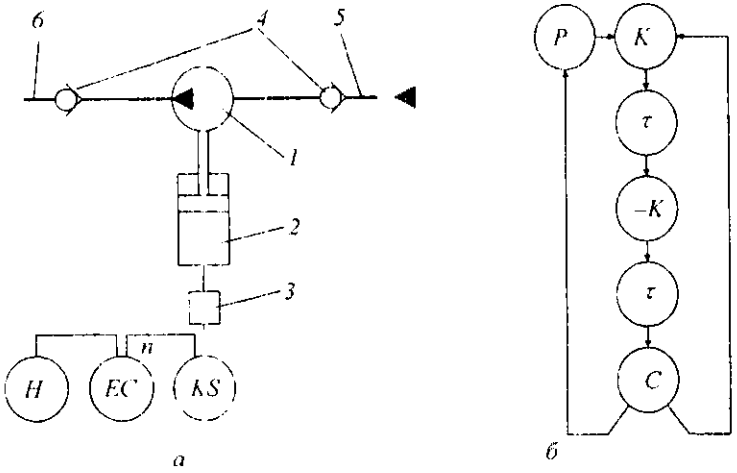


Рис. 8.24

Схемы на рис. 8.25 представляют объёмное дозирование жидкости с использованием вакуума. Трубопроводы *1–4* с запорными клапанами *К1–К4* соединяют мерный цилиндр (дозатор) *5* соответственно с ёмкостью 6, содержащей дозируемую жидкость, вакуумной системой, сетью сжатого воздуха и смесителем, в который следует подавать полученные дозы.

Дозируемый объём задаётся уровнемерами *LE* верхнего (*Н*) и нижнего (*L*) уровней. При дозировании вначале жидкость вакуумом всасывается в мерный цилиндр до верхнего уровнемера, а при команде на выдачу дозы последняя выталкивается давлением сжатого воздуха в смеситель.

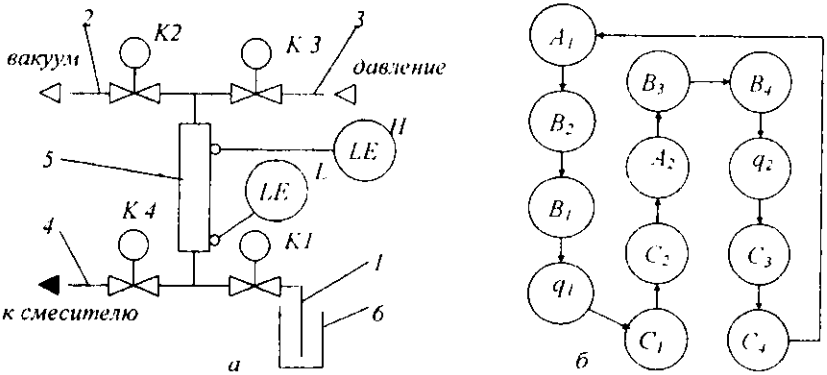


Рис. 8.25

В граф-схеме алгоритма обозначено: команды A_1 и A_2 – команды на выполнение дозирования и выдачу дозы в смеситель; q_1 и q_2 – сигналы верхнего и нижнего уровнемеров (у первого – о наличии, а у второго – об отсутствии жидкости на соответствующем уровне); B_i и C_i (индексы i соответствуют номерам клапанов на рис. 8.25,а) – команды на открытие и закрытие клапанов.

В исходном состоянии все клапаны закрыты. При получении команды A_1 на выполнение дозирования операторами B_2 и B_1 открываются клапаны *K2* и *K1*, и жидкость всасывается из ёмкости *6* в мерный цилиндр дозатора. Достижение жидкостью датчика верхнего уровня вызывает появление его сигнала $q_1 = 1$. По этому сигналу от системы дозирования отключается вакуум и ёмкость 6 (командами C_1 *и* C_2, которые закрывают клапаны *K1 и K2*). В этой точке алгоритма отмеренная доза находится в цилиндре 5.

При получении команды A_2 на выдачу дозы в смеситель – в цилиндр *5* – подаётся давление из сети сжатого воздуха (команда B_3 открывает клапан *K3*), а мерный цилиндр соединяется со смесителем (команда B_4 открывает клапан *K4*). Когда уровень жидкости в цилиндре *5* опустится до нижнего уровнемера, он выдаст сигнал $q_2 = 1$. Следовательно, вся требуемая доза поступила в смеситель. Тогда командами C_3 и C_4 система дозирования отключается от смесителя и сети сжатого воздуха и приходит в исходное состояние.

§ 6. Алгоритмы опроса датчиков. Контроль состояния оборудования

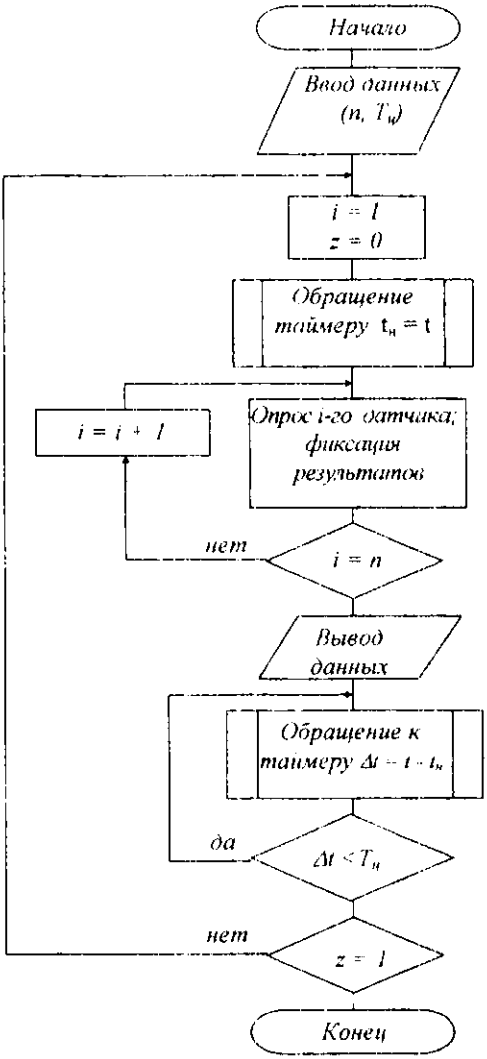


Рис. 8.26

Один из методов проведения автоматического контроля состояния и работоспособности оборудования заключается в установке датчиков, контролирующих основные параметры и условия работы оборудования, и в периодическом опросе их показаний. Для этого используются наиболее простые по устройству приборы релейного типа, сообщающие о выполнении (невыполнении) контролируемого параметра.

Различают циклический и адресный опрос датчиков. Режим получения данных, когда все или группа датчиков, установленных на объекте, периодически опрашиваются в заданной последовательности, называется *циклическим опросом датчиков*. Режим получения данных, при котором опрашивается один или несколько датчиков, адрес (номер) которых указывается оператором или определяется автоматически в ходе выполнения некоторого алгоритма обработки данных, называется *адресным опросом датчиков*.

Алгоритм циклического опроса датчиков показан на рис. 8.26. Решается задача опроса показаний n датчиков с периодом опроса $T_ц$.

Ведется опрос датчиков, начиная с первого. Показание датчика запоминается, и после окончания очередного опроса результат выводится на внешнее устройство. После очередного опроса программа выполняет заданную выдержку времени и вновь повторяет опрос. Прекращение работы алгоритма задается специальным условием $z = 1$. Этот признак вводится оператором. При необходимости алгоритм можно модифицировать, с тем чтобы он, например, сигнализировал при отклонениях показаний датчиков от заданных значений.

Циклический опрос датчиков применен в программе контроля состояния гидростанции автоматической формовочной линии. Гидростанция оснащена датчиками уровня жидкости в баке, датчиками температуры и давления жидкости на выходе из гидростанции, а также двумя датчиками давления на каждом фильтре (на входе и выходе из фильтра). По разнице давлений на входе и выходе фильтра можно судить о его состоянии.

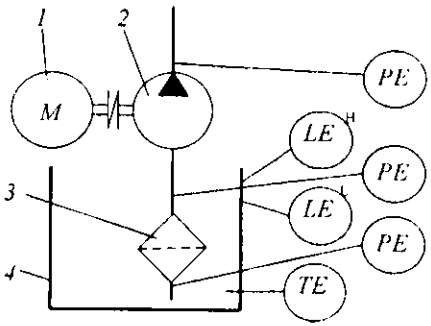


Рис. 8.27

На рис. 8.27 показана схема оснащения гидростанции датчиками (*1* – электродвигатель, *2* – насос, *3* – фильтр, *4* – гидробак). После запуска этой программы и опроса датчиков на монитор выводится информация о состоянии гидростанции следующего вида (табл. 8.2).

Таблица 8.2

Параметр	Показание
Уровень жидкости	
выше нормы	нет
ниже нормы	нет
Температура жидкости	
выше нормы	нет
ниже нормы	нет
Давление на выходе	
выше нормы	нет
ниже нормы	нет
Сопротивление фильтра	
выше нормы	нет

Разработаны варианты подобных программ, которые производят периодический опрос всех датчиков, сопоставляют их показания с нормой, подсчитывают количество выходов каждого параметра из заданных пределов за определенный период времени или подают сигнал о наличии неисправности.

Как правило, для такого контроля применяются простейшие датчики релейного типа.

Системы управления автоматическими линиями имеют контрольные датчики, которые реагируют на положение или состояние технологического оборудования. Контрольные датчики, встраиваемые в технологическое оборудование, представляют собой преобразователи различных неэлектрических величин в электрический сигнал. Подавляющее большинство этих устройств представляют собой дискретные датчики предельных значений величин и имеют релейную характеристику. Они только показывают, достигнуто установленное значение контролируемого параметра или нет, подают при необходимости аварийный сигнал.

Для проверки состояния машин с большим числом механизмов, работающих по жёсткой циклограмме (например, машин и механизмов АФЛ с большим количеством пневматических и гидравлических приводов), применяется контроль циклограммы их работы. Отклонение от заданного времени срабатывания механизма свидетельствует о его неисправности. При запуске программы контроля циклограммы компьютер на протяжении одного цикла работы машины фиксирует моменты срабатывания этих датчиков и определяет время между их срабатываниями (или определяет время работы включаемых ими механизмов). Затем на монитор выводится таблица, по которой судят о состоянии машины. Возможна также организация периодического запуска такой программы с выдачей аварийных сигналов при отклонении фактического времени срабатывания от заданного.

Диагностика состояния сложной машины может выполняться с использованием методов распознавания или обнаружения событий. Пример такого распознавания приведён ниже.

Транспортные системы литейного цеха с большим количеством ленточных транспортёров и элеваторов, а также подвесных конвейеров в обязательном порядке оснащаются датчиками состояния механизмов, например реле контроля скорости, контролирующих вращение неприводных роликов, барабанов или звёздочек. Системы транспортёров и входящих в транспортную систему установок блокируются между собой. Выход из строя одного элемента транспортной сис-

темы автоматически вызывает остановку всех предшествующих элементов системы.

§ 7. Распознавание образов. Управление качеством отливок. Диагностика состояния оборудования

В инженерной практике часто встречается необходимость определить, к какой группе образов относится распознаваемый объект. Объекты, о которых идёт речь, могут быть самыми разными. Это могут быть отливки, полученные при разных условиях и имеющие характерные виды брака в каждой партии. По типичному виду брака надо определить, к какой группе (*классу*, *таксону*, где в каждом классе собраны образцы именно с определённым дефектом, причём причины этого дефекта известны) относится распознаваемая партия. Так иногда распознают причины появления массового брака отливок.

Управление качеством отливок

При управлении качеством отливок может возникнуть необходимость быстро определить значения технологических параметров, имевших место при изготовлении отливок, по результатам работы производственной системы, то есть по качеству отливок, полученных в одной партии, за истекшие сутки и т.п. Такая необходимость возникает, если время определения значений некоторых технологических параметров слишком велико (например, требуется длительный лабораторный анализ), а частота анализов недостаточна для использования их в режиме реального времени, то есть для оперативного управления литейным процессом.

Для решения этой задачи методами теории распознавания образов на основе статистической информации о производственных данных строится матрица Y характеристик качества отливок и матрица X соответствующих параметров технологии:

$$Y = \begin{bmatrix} y_{11} & y_{12} & \cdots & y_{1K} \\ y_{21} & y_{22} & \cdots & y_{2K} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ y_{N1} & y_{N2} & \cdots & y_{NK} \end{bmatrix}, \quad X = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \cdots & x_{1M} \\ x_{21} & x_{22} & \cdots & x_{2M} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ x_{N1} & x_{2N} & \cdots & x_{NM} \end{bmatrix},$$

где N – число строк в матрицах;

K – число характеристик качества отливок;

M – число параметров технологического процесса.

Каждая строка матрицы Y отражает одну конкретную ситуацию, значимо отличную (в статистическом смысле) от других строк, и представляет вектор качества отливок $Y_i = (y_{i1}, y_{i2} \ldots y_{iK})$ для этого случая.

При анализе очередной партии отливок, поступившей для распознавания, по наличию дефектов в этой партии формируется вектор качества этой партии $Y^* = (y^*_1, y^*_2 \ldots y^*_K)$. В матрице Y отыскивается строка, описывающая некоторый вектор Y_i, ближайший к вектору Y^*. При автоматическом выполнении поиска используются методы теории распознавания образов.

Строка X_i матрицы X, соответствующая найденной строке Y_i, принимается за искомый вектор технологических параметров X^* анализируемой партии отливок. Содержащаяся в нём информация о технологических параметрах используется для выработки управляющих воздействий.

Достоверность результата распознавания технологических параметров, особенно при ограниченном объёме обучающей выборки (матриц X и Y), может быть повышена за счет регрессионного анализа.

Возможны ситуации, когда несколько разных комбинаций значений технологических параметров приводят к одному и тому же значению вектора качества отливок. Это должно учитываться при построении матриц X и Y, в этом случае результаты распознавания будут неоднозначны. Для устранения этой неоднозначности метод распознавания может быть модифицирован.

Графически идея такого распознавания может быть пояснена схемой на рис. 8.28. Она построена только для двумерного вектора качества, то есть в случае двух характеристик качества.

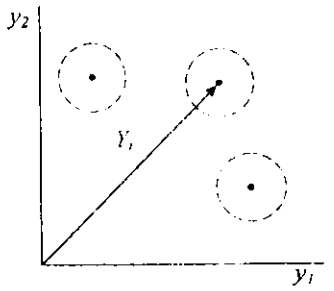


Рис. 8.28

Каждая строка матрицы Y представляет собой точку – центр определённого i-го образа, или класса, таксона, вокруг которого группируются отдельные образцы (отливки) или партии отливок с близкими характеристиками качества (на схеме они представлены сферой вокруг центра таксона). Положение этой точки определяется соответствующим вектором качества Y_i.

Задача распознавания в простейшем варианте применения – найти среди этих точек ближайшую к точке, которая представляет характеристики полученной партии отли-

вок, и отнести к ней информацию о технологических параметрах, содержащуюся в соответствующей строке матрицы X.

При применении этой методики в цехе для производства алюминиевых отливок сложной конфигурации массой до 150 кг с толщиной стенки 10–20 мм, изготавливаемых в песчаных формах с большим количеством стержней, за показатели качества отливок (то есть за компоненты вектора Y) было принято наличие и количество наиболее распространённых для таких отливок дефектов: горячих трещин, газоусадочных раковин, пористости и засоров.

Основными технологическими параметрами, влияющими на уровень дефектности таких отливок (то есть за компоненты вектора X), при соответствующем статистическом исследовании (для конкретного производства) были установлены:

- для сплава – величина перегрева, химический состав, температура заливки, газонасыщенность;
- для формовочной смеси – влажность, газопроницаемость, уплотняемость, формуемость, осыпаемость, содержание органических примесей и активной глинистой составляющей;
- для стержневой смеси – прочность, газопроницаемость, потеря массы при прокаливании и осыпаемость.

Перечисленные параметры характеризуются высокой информативностью и отсутствием значимых корреляционных зависимостей, существуют методики их определения и возможность их оперативного изменения.

Для учёта конструктивных особенностей отливок и их индивидуальной чувствительности к образованию того или иного вида дефекта вводятся коэффициенты индивидуальной чувствительности $K_{и.ч}$, которые находятся как отношение величины брака по j-му виду брака для данного наименования отливки к средней величине j-го вида брака для всей номенклатуры отливок, где $j = 1,...K$. При формировании обучающей выборки и вектора качества распознаваемой партии величина вида брака по отливке каждого наименования умножается на величину, обратную соответствующему $K_{и.ч}$.

Обнаружение неисправностей в сложной системе

Другое приложение методов распознавания образов – обнаружение неисправностей в сложной системе. В этом случае может потребоваться по поведению этой системы найти место появления неисправности.

Задача распознавания образов сводится к формулировке правил, по которым можно было бы указать, к какому классу объектов из числа определённых (а классы объектов в каждой конкретной задаче определяются по общности некоторых признаков этих объектов, существенных для решаемой задачи) принадлежит тот или иной объект.

Простейшим примером использования этой идеи является контроль исправности оборудования, например автоматической линии формовки, по времени срабатывания её механизмов. Многие неисправности приводов автоматической линии изменяют время их срабатывания. Компьютер запоминает моменты срабатывания датчиков, фиксирующих моменты окончания отдельных переходов, и вычисляет время работы соответствующих механизмов. Затем вычисленное время сопоставляется с эталонным, полученным при нормальной работе механизмов. Существенно различные значения свидетельствуют о наличии неисправности, связанной с каким-либо механизмом.

Здесь метод распознавания образов рассматривается на примере диагностики и управления рычажным механизмом запирания машины литья под давлением. Появление той или иной неисправности в этом механизме можно определить по характеру изменения давления в цилиндре запирания при его работе.

Программа программируемого контроллера сопоставляет графики давления в цилиндре механизма запирания при запирании формы с эталонным графиком (здесь эталонным графиком назван график давления, получаемый при нормальной работе механизма). При различных отклонениях этих графиков от эталона программа выполняет диагностику неисправности и вырабатывает необходимые управляющие воздействия.

Механизм запирания машины (рис. 8.29) состоит из передней плиты *1*, закрепленной на станине машины, 4-х колонн *2*, закрепленных в

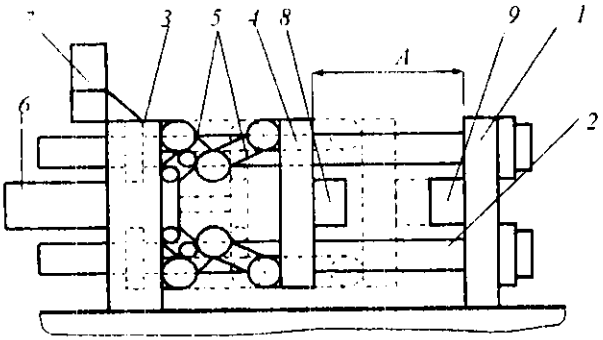


Рис. 8.29

плите *1*, задней плиты *3* и подвижной плиты *4*. Последняя соединена с плитой *3* рычажной системой *5*, приводимой в движение гидроцилиндром запирания *6*. При ходе его поршня вправо рычаги выпрямляются, и подвижная плита закрывает форму, подвижная и неподвижная части которой *8* и *9* закреплены, соответственно, на подвижной и передней плитах. Задняя плита соединена с колоннами *2* не жестко, а через ходовые гайки. При вращении этих гаек плита *3*, а вместе с ней и рычажный механизм *5* с плитой *4* перемещаются вдоль колонн. Таким образом можно изменять расстояние *A* между плитами *1* и *4*. Вращение гайкам на колоннах *2* передается от двигателя *7* через редуктор и большую шестерню, размещенную внутри плиты *3*.

Для того чтобы сжать части формы с достаточным усилием, механизм запирания настраивается так, чтобы соприкосновение полуформ происходило до того, как рычаги *5* полностью выпрямятся. При дальнейшем ходе гидроцилиндра и выпрямлении рычагов (при этом колонны *2* растягиваются, а рычаги *5*, плиты *1* и *4* и полуформы *8* и *9* сжимаются) создается определенное усилие сжатия полуформ. Величина этого усилия обычно определяется по удлинению колонн *2*.

Наладка усилия запирания заключается в том, что при закрытии формы измеряют удлинение колонн и по нему рассчитывают усилие запирания; при необходимости перемещают плиту *3* (при раскрытой форме), добиваясь заданной величины этого усилия.

Автоматическое управление механизмом запирания производится на основе анализа давления в гидроцилиндре *6* (см. рис. 8.29) при запирании формы.

График давления в исправном и правильно настроенном механизме изображен на рис. 8.30,а (p – давление, τ – время). На начальном участке (*0–1*) давление нарастает до величины, необходимой для преодоления сил трения покоя, затем поршень цилиндра приходит в движение, выбираются зазоры в шарнирах рычажной системы. На участке *1–2* происходит перемещение подвижной плиты. В момент *2* половины формы смыкаются. До момента *3* выбираются зазоры в шарнирах механизма и в форме. Затем происходит упругая деформация элементов машины (растяжение колонн, сжатие рычагов и формы), при этом усилие запирания возрастает от *0* до максимального в момент *5*; давление в цилиндре в этот период сначала возрастает до максимума в точке *4*, а затем снижается (из-за резкого увеличения коэффициента усиления рычажной системы в конце хода выпрямления рычагов). На участке *5–6* давление в цилиндре возрастает до давления, создаваемого насосами машины.

На рис. 8.30, б–е показаны графики давления, которые имеют место при различных неисправностях или неправильной наладке механизма. На рис. 8.30,б показан график при наладке механизма на меньшее усилие запирания.

График по рис. 8.30,в имеет место в том случае, если расстояние между подвижной и передней плитами слишком мало и рычаги полностью не выпрямлены. Следовательно, необходимое усилие запирания не создано. Такой же график будет получен в случае, если расстояние A (см. рис. 8.29) слишком велико и форма не сомкнулась. Из рис. 8.30,г видно, что произошло преждевременное нарастание давления до момента смыкания формы. Причиной может быть повреждение шарниров рычагов, отсутствие смазки, образование *задиров на*

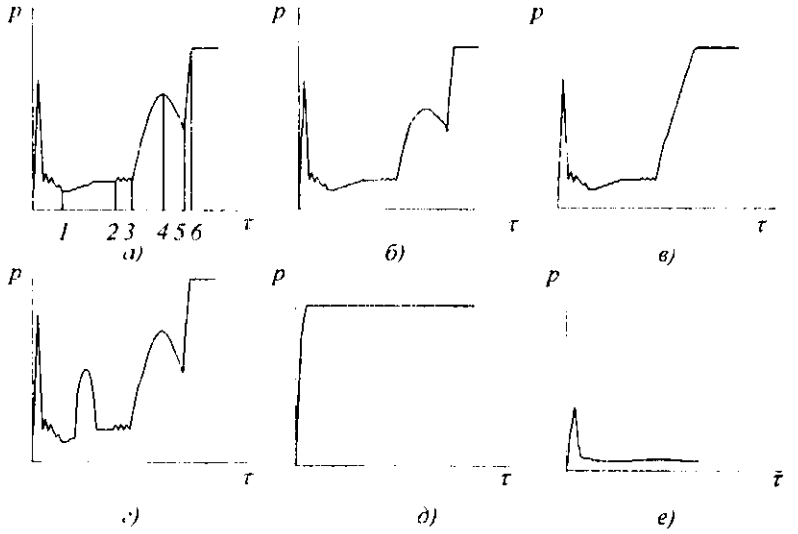


Рис. 8.30

трущихся поверхностях. График на рис. 8.30,д показывает, что поршень цилиндра не пришел в движение, в результате чего давление в цилиндре почти сразу поднялось до максимального, обеспечиваемого насосами машины. О неисправности электрической или гидравлической системы машины (нет давления или не переключился гидрораспределитель) можно судить по графику на рис. 8.30,е.

В ПК подаются сигналы датчика давления, установленного в гидроцилиндре механизма, и конечных выключателей S_1 и S_2, контро-

лирующих открытое и закрытое положение подвижной плиты. Программа управления процессом запирания формы вырабатывает следующие команды:

- открыть подвижную плиту;
- закрыть подвижную плиту;
- включить механизм наладки на уменьшение усилия запирания;
- включить механизм наладки на увеличение усилия запирания;
- задаёт время включения механизма наладки (для регулировки усилия запирания);
- запрессовка разрешена;
- запрессовка запрещена.

Кроме этого, выдается диагностика неисправности.

Управление механизмом запирания осуществляется следующим образом. Одновременно с командой на закрытие формы в ПК начинает выполняться программа управления механизмом запирания. Общая схема программы сводится к следующему. Производится периодический опрос датчика давления и анализ кривой давления в течение всего процесса запирания. В случае если получаемая зависимость соответствует вариантам рис. 8.30,г,д,е, заливка металла в камеру прессования не производится, машина останавливается, и выдается диагностика неисправности. Если кривая давления имеет характер, соответствующий рис. 8.30,а,б, то определяется величина пикового давления между точками *3–5*; при необходимости механизм переналаживается для достижения заданного максимального давления (в точке *4*), и при получении требуемого давления дается разрешение на продолжение цикла. Если кривая давления аналогична показанной на рис. 8.30,в, также производится наладка механизма.

Возможные режимы работы механизма запирания совмещены на рис. 8.31. Здесь же указаны параметры, по которым ПК производит анализ графика давления. На рис. 8.31,а изображены графики давления, на рис. 8.31,б – функции состояния конечных выключателей J_{S1} и J_{S2} соответственно конечных выключателей S_1 и S_2. Значение *1* соответствует нажатию выключателя; *0* – выключатель не нажат.

На рис. 8.31,а кривая *1* соответствует графику давления при нормальной работе механизма запирания;

кривые 2 и *3* отображают давление при недопустимо низком и высоком усилиях запирания;

кривая 4 показывает, что рычаги полностью не выпрямились, и подвижный блок (плиты *3* и *4* на рис. 8.29) необходимо отодвинуть от передней плиты;

кривая 5 имеет место при наличии повреждений или задиров в шарнирах рычагов, отсутствии смазки в них;

кривая 6 появляется при заклинивании поршня или повреждении рычагов (при этом подвижная плита не начинает движение, и S_1 не отпускается, то есть функция J_{S1} не изменяется от *1* до *0*);

кривая 7 показывает неисправность электро- или гидросистемы.

Для распознавания указанных режимов работы механизма в программу управления необходимо ввести сяедующие параметры (рис. 8.31):

τ_{s1} – время, до истечения которого выключатель S_1 должен разомкнуться;

p_0 - пороговое значение давления при движении подвижной плиты (включая выборку зазоров в начале и в конце движения), превышение которого будет свидетельствовать о неисправности механизма;

τ_{mn} – минимальное время, в течение которого пороговое значение давления $p_д$ не должно быть превышено;

τ_{mx} – максимальное время, за которое должно произойти смыкание полуформ, а давление должно превысить пороговое значение p_0.

$p_{зад}$ – максимальное давление при запирании, соответствующее заданному усилию запирания;

Δp_0 – допустимое изменение давления $p_{зад}$; выход максимального давления при запирании за пределы $p_{зад} \pm \Delta p_0$ свидетельствует о наступлении режимов *2* или *3*;

$p_н$ – максимальное давление в гидросистеме, обеспечиваемое на-

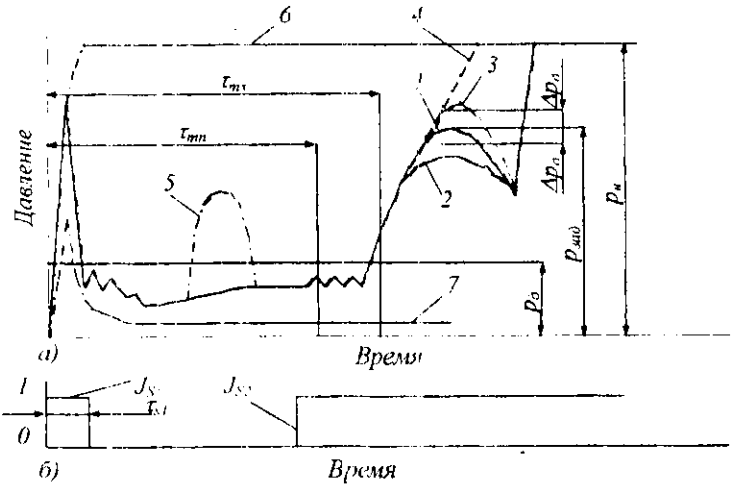


Рис. 8.31

сосами машины.

Автоматическая подналадка механизма на заданное усилие запирания (на заданное давление $p_{зад}$) при сравнительно небольших отклонениях может быть выполнена следующим образом. Опытным путем находится зависимость изменения максимального давления при запирании Δp от времени включения привода механизма наладки $\tau_{нк}$ (кривая *1* на рис. 8.32). Она линеаризируется (кривая *2*), и у линеаризированной характеристики определяются параметры: время запаздывания τ_0 и $a = tg\alpha$.

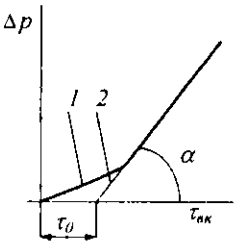


Рис. 8.32

Таким образом, $\Delta p = a\,(\tau_{нк} - \tau_0)$, и для изменения максимального давления при запирании на Δp время включения привода механизма наладки $\tau_{нк}$ должно быть:

$$\tau_{вк} = \Delta p/a + \tau_0.$$

ПК определяет необходимую величину Δp, рассчитывает $\tau_{вк}$ и передает их в соответствующее управляющее устройство (или в подпрограмму регулирования усилия запирания).

На рис. 8.33 приведён алгоритм управляющей программы, которая будет обеспечивать правильное распознавание графиков давления при нормальной работе машины и различных неисправностях (см. рис. 8.31) и выдавать соответствующую диагностику и команды управления.

Программа считывает значения датчиков $p(\tau)$ и $J_{S1}(\tau)$ в текущий момент времени τ (по ним можно построить график, аналогичный изображенному на рис. 8.30 и 8.31). После анализа текущих значений p и J_{S1} следует обратиться к таймеру, произвести временную задержку $\Delta\tau$, а затем ввести новые текущие значения p и J_{S1}.

Для сокращения алгоритма вместо передачи команд в систему управления машиной программа выводит их на монитор. Не указаны и действия, связанные с опросом датчиков. Кроме того, алгоритм не распознаёт ситуацию, когда график давления аналогичен графику, представленному на рис. 8.30,в.

Схема алгоритма программы

Схема алгоритма программы показана на рис. 8.33. Блок *1* вводит управляющие параметры. Блок *2* задает начало отсчета времени, а блок *3* обеспечивает шаг по времени $\Delta\tau$. Блок *4* сравнивает текущее значение p с p_n, а блок *6* проверяет состояние S_1. При нормальном ходе

процесса программа циркулирует между блоками *3, 4, 6, 7* до тех пор, пока не разомкнется S_1. Если в это время возникает ситуация $p \geq p_н$ или $\tau \geq \tau_{м1}$, то будет выдана диагностика неисправности, а машина остановится. После размыкания S_1 программа, перемещаясь с шагом $\Delta\tau$ (блок 9), проверяет текущее давление (блок *10*) и время (блок *11*).

Пока $p < p_н$ а $\tau < \tau_{mx}$, продолжается циклический опрос кривой давления (цикл включает блоки *9, 10, 11*). Если p не возрастает, а τ_{mx} будет превышено, то через блок *11* программа выходит из цикла, выдает диагностику и команду на остановку машины. Если возникает ситуация $p \geq p_н$ при $\tau < \tau_{mx}$, то из блока *10* программа идет к блоку *13*, и при $\tau < \tau_{mn}$ выдается диагностика неисправности, а машина останавливается; если же $\tau \geq \tau_{mn}$, т.е. давление показывает нормальное протекание процесса, программа направляется к блоку *15*.

Теперь процесс находится в точке *3* (см. рис. 8.30,а), и задачей программы является анализ кривой давления между точками *3* и *5*. Для этого в программе блоки с *15* по *19* формируют массив из N текущих значений p с шагом по времени $\Delta\tau$, которому присвоено имя P. Шаг по времени выбран таким, что N-й элемент массива оказывается обязательно на горизонтальной части кривой *1* (см. рис. 8.30,а). В блоках с *20* по *28* отыскивается первый максимум p_{max} на графике давления p, записанном в массиве P. Для этого в блоке *20* переменной p_{max} присваивается значение первого элемента массива – $P(1)$. С ним сравнивается значение 2-го элемента массива (блок *24*). Если оно больше, то переменной p_{max} присваивается значение 2-го элемента (блок *27*). Затем проверяется следующий элемент массива P, причем цикл этих проверок замыкается через блоки *28, 25, 26*.

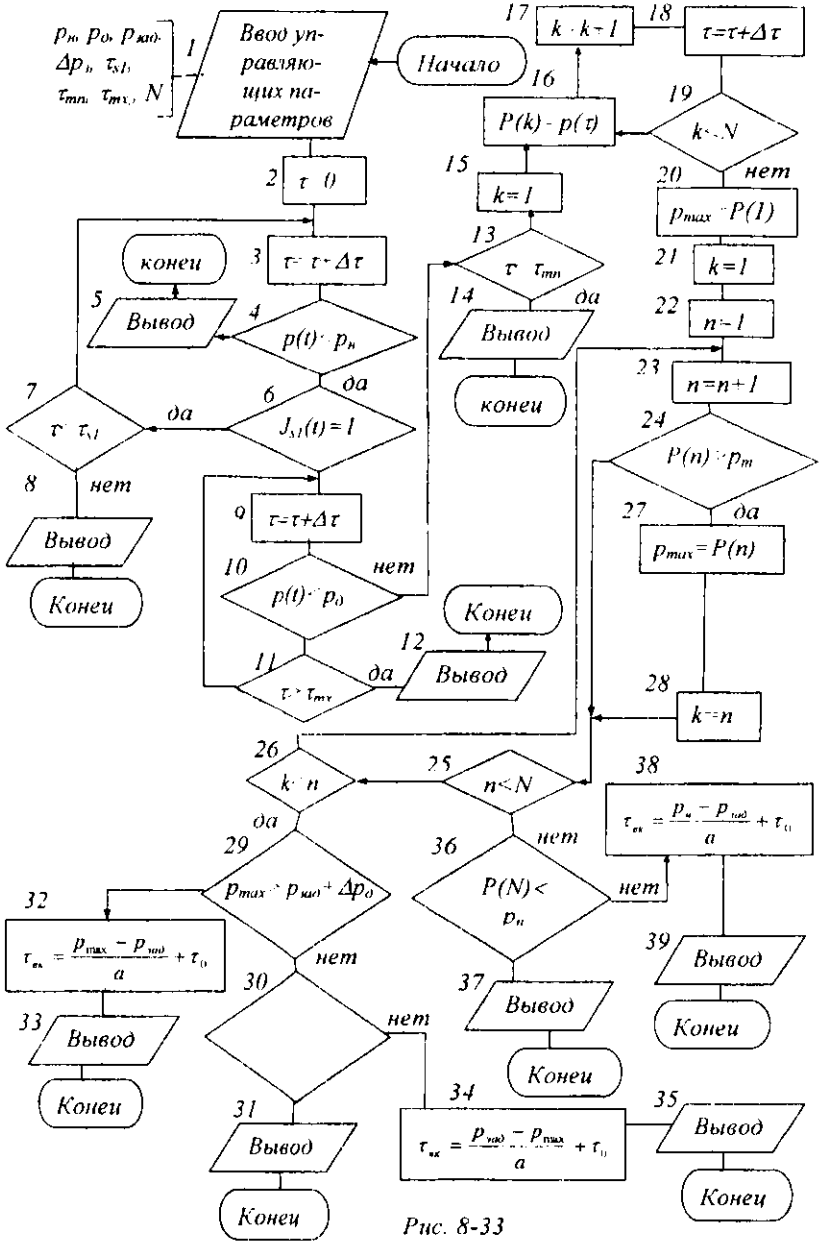


Рис. 8-33

Переменная n в этом цикле служит для счета элементов массива P, и при $n = N$ происходит выход из цикла в блоке *25*. Переменная k служит индексом того, что очередной элемент массива P больше предыдущего (то есть давление возрастает, и максимум пока не достигнут). В этом случае в блоке *28* значение k приравнивается к n, и блок *26* при $k = n$ замыкает цикл, возвращая программу к блоку *23*. Если же очередной элемент массива P окажется меньше предыдущего (который, очевидно, и является первым максимумом), то выход из блока *24* минует блоки *27* и *28*, при этом $k = n - 1$, в переменной p_{max} сохраняется значение предыдущего элемента массива P, являющееся максимальным, и блок *26* при $k < n$ выводит программу из цикла.

Если до $n = N$ максимум не обнаружен (следовательно, график $p(\tau)$ соответствует кривой на рис. 8.30,в), то блок *25* прерывает цикл; блок *36* проверяет, достигнуто ли максимальное давление в гидросистеме $p_н$.

Если $p_н$ достигнуто, то блок *38* рассчитывает задание для механизма наладки (время включения $\tau_{вк}$ по схеме на рис. 8.32), а блок *39* выводит диагностику неисправности и команду для машины. Если же $p_н$ не достигнуто, то блок *37* производит вывод соответствующей диагностики и команду на остановку машины.

При выходе из цикла через блок *26* в блоках *29* и *30* проверяется, находится ли p_{max} в допустимом диапазоне давлений $p_{зад} \pm \Delta p_0$. Если это условие выполняется, то через блок *31* выдается разрешение на продолжение цикла работы машины. Если оно не выполняется, то в блоках *32* или *34* вычисляется $\tau_{вк}$, а блоки *33* или *35* выводят диагностику и команды механизму наладки.

Задания для самостоятельной работы

Изменить схему алгоритма управляющей программы таким образом, чтобы она дополнительно выполняла следующие действия:

1. Определение и вывод на печать максимального давления при движении с места (до размыкания S_1).
2. Определение и вывод на печать максимального давления при движении подвижной плиты.
3. Определение и вывод на печать максимального давления на каждом из указанных далее трёх участков движения подвижной плиты (выбор зазоров при движении с места, движение до соприкосновения полуформ, выбор зазоров после соприкосновения полуформ).
4. Анализ и вывод на печать величины давления p_0 при преждевременном его превышении (режим 5, рис. 8.31). При незначительном

его превышении вывести только диагностику о его превышении, в противном случае дать команду на остановку машины.

5. Определение и вывод на печать максимального колебания давления при движении подвижной плиты.

6. Определение максимального колебания давления при движении подвижной плиты и сравнение его с заданным допустимым колебанием. При превышении последнего вывести на печать информацию об этом.

7. Определение максимума давления при распрямлении рычагов сразу же после его прохождения, а не после формирования массива значений давления, как это делается в схеме алгоритма программы.

8. В приведённом на рис. 8.33 алгоритме не используется контроль состояния конечного выключателя S_2, (рис. 8.31), фиксирующего замыкание формы, поэтому ситуация в случае получения кривой (см. рис. 8.30,в) не определена (не сомкнулась форма или не распрямились рычаги). Ввести в алгоритм получение сигналов датчика S_2 и обеспечить распознавание указанных режимов.

9. Указать содержание информации, выводимой в блоках *«Вывод»* в схеме алгоритма управляющей программы (какие неисправности обнаружены).

§ 8. Идентификация текущего режима (плавка в дуговой печи)

Постановка задачи

Задача на идентификацию текущего режима возникает, если технологический процесс состоит из ряда сменяющих друг друга периодов или состояний, и при переходе от одного периода к другому требуется менять параметры технологического процесса, причем определить окончание очередного периода каким-либо датчиком невозможно. Такая задача может быть решена с использованием статистических методов принятия решений для двух альтернативных ситуаций.

Например, процесс плавки в дуговой плавильной печи может быть разбит на несколько сменяющих друг друга состояний или периодов (проплавление колодцев, подплавление колодцев, основное расплавление, технологические фазы – окисление, восстановление), отличающихся стабильностью дуги, положением в печи твёрдой шихты, степенью экранирования футеровки и другими факторами. Для каждого из этих состояний (периодов) могут быть выбраны рациональные электрические режимы (мощность дуг, напряжение), чтобы обеспечить максимальное использование мощности печи и мини-

мально возможное тепловое воздействие на футеровку. Для своевременного изменения энергетического режима плавки требуется определить окончание очередного периода процесса, то есть идентифицировать текущий режим.

В процессе плавки могут контролироваться некоторые параметры, значения которых зависят от состояния процесса. Например, колебательность и гармонический состав токов, очевидно, будут различны при работе дуг в так называемых «колодцах» на холодную шихту или на хорошо прогретый, полностью расплавленный металл. Однако каждый из контролируемых параметров характеризует то или иное состояние только с определённой степенью вероятности. Так, даже при работе в колодцах могут иметь место отдельные моменты относительно более высокой стабильности дуг. Поэтому можно говорить только об определённом математическом ожидании и дисперсии контролируемых параметров y_i на каждом из интервалов. На рис. 8.34 показано распределение вероятностей такого параметра y на двух соседних интервалах, например *1* и *2*.

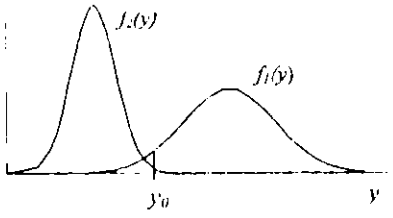


Рис. 8.34

Если математические ожидания и дисперсии этого параметра на соседних интервалах заметно отличаются друг от друга, то он может использоваться для идентификации текущего периода. Тем не менее, степень достоверности при использовании только одного параметра будет невысокой, так как всегда существует зона перекрытия, то есть зона значений, возможных на двух соседних интервалах. Степень достоверности идентификации может быть существенно повышена за счет использования нескольких контролируемых параметров.

Использование предварительной информации. Априорная вероятность

Определять большую или меньшую вероятность того или иного состояния непосредственно по графикам распределения вероятностей (рис. 8.34) неверно. Эти функции рассчитываются при условии, что соответствующее событие (состояние *1* или *2*) имеет место, а в решаемой задаче представляют только условные вероятности. Дополнительная информация о вероятности существования состояния *1* или *2* определяется из предварительного изучения процесса, например при длительных наблюдениях за ним. Такая предварительная информация

называется априорной (от латинского *a priori* – из предшествующего – понятие, характеризующее знание, предшествующее опыту и независимое от него), а соответствующая вероятность – *априорной*. В нашем случае для определения вероятности существования состояния *1* или *2* может быть использована информация о длительности протекания первого из двух смежных периодов процесса или о расходе энергии в этот период. Опыт показал, что расход энергии является более информативным для энергетических периодов плавки (проплавление, расплавление и т. п.), а длительность периода – для технологических периодов (окисление, восстановление), так как она связана с диффузионными процессами, существенно зависящими от времени.

Выбранный для определения априорной вероятности параметр z (длительность периода или расход энергии в нём) также является величиной вероятностной и характеризуется математическим ожиданием и дисперсией, поэтому вероятность p_1 существования состояния *1* равна:

$$p_1 = F(z_0),$$

где F – интегральная функция распределения параметра z; z_0 – значение z в момент определения вероятности p_1.

Поскольку в рассматриваемом примере состояния *1* и *2* несовместные и образуют полную группу, то $p_1 + p_2 = 1$ и $p_2 = 1 - p_1$

Выбор априорной вероятности зависит от конкретной задачи идентификации. Например, определяется принадлежность каких-либо объектов к двум различным группам (*1* или *2*) на основе некоторых известных свойств этих объектов, причём свойства объектов в разных группах различаются только в статистическом смысле. Тогда в качестве априорной вероятности целесообразно принять вероятность принадлежности объекта к этим группам. Например, в предварительном исследовании установлено, что из всех поступающих на распознавание объектов 75% относятся к группе *1*, а 25% – к группе *2*, тогда соответствующие априорные вероятности будут равны: $p_1 = 0{,}75$, $p_2 = 0{,}25$.

Правило Байеса

Задачу идентификации состояния процесса теперь можно сформулировать следующим образом. Необходимо принять решение о существовании одного из соседних состояний, признаки которых обозначены индексами *1* и *2*, на основании контроля ряда параметров $y_i (i=1,2,...n)$. В качестве априорной информации (т.е. информации, известной нам до измерения контролируемых параметров y_i) заданы функции распределения плотности вероятностей $f_1(y_i)$ и $f_2(y_i)$ значений

признаков y_1 и y_2 для этих состояний, а также априорные вероятности p_1 и p_2 существования каждого из состояний.

Принятие решения заключается в том, что назначается какое-то значение y_0, которое принимается как граница между состояниями *1* и *2*. Значение y_0 выбирается по каким-либо соображениям и производится с некоторой погрешностью. Разбиение интервала параметра на две области так, чтобы минимизировать среднюю стоимость ошибки идентификации, проводится по критерию Байеса. Существуют и другие критерии: минимаксный, Неймана – Пирсона и др.

Вводится понятие потерь (стоимости) при правильных и ошибочных решениях, а затем отыскивается решающее правило для разделения состояний *1* и *2*, обеспечивающее минимум потерь.

Матрица стоимости решений имеет вид:

$$\begin{pmatrix} c_{11} & c_{12} \\ c_{21} & c_{22} \end{pmatrix},$$

где c_{11} и c_{22} – стоимости (потери) при правильных решениях; c_{12} и c_{21} – потери при ошибочных идентификациях состояний, когда соответственно состояние *1* определяется как состояние *2* и наоборот.

Средняя стоимость потерь при многократных идентификациях c_{cp} будет равна сумме всех стоимостей, умноженных на вероятности их получения с учётом априорных вероятностей:

$$c_{cp} = p_1(c_{11}\int_{y_0}^{\infty} f_1(y)dy + c_{12}\int_{-\infty}^{y_0} f_1(y)dy) + p_2(c_{22}\int_{-\infty}^{y_0} f_2(y)dy + c_{21}\int_{y_0}^{\infty} f_2(y)dy).$$

Можно найти значение y_0, обеспечивающее минимальную величину c_{cp}, для чего продифференцируем c_{cp} по y и приравняем производную нулю. При дальнейших выкладках надо учесть соотношения:

$$\int_{-\infty}^{y_0} f(y)dy = F(y_0); \quad \int_{y_0}^{\infty} f(y)dy = 1 - F(y_0); \quad \frac{dF(y)}{dy} = f(y).$$

Производная в точке y_0 равна

$$\left.\frac{dc_{cp}}{dy}\right|_{y=y_0} = p_1 f_1(y_0)(c_{12} - c_{11}) - p_2 f_2(y_0)(c_{21} - c_{22}) = 0.$$

Обычно можно принять $c_{11}=c_{22}=0$, $c_{12}=c_{21}$.

Для контроля состояния процесса находить величину y_0 не требуется. Достаточно определить знак выражения $p_1 f_1(y) - p_2 f_2(y)$. Для этого надо периодически определять значение y, подсчитать для него $f_1(y)$, $f_2(y)$, текущие значения $p_1(z)$ и $p_2=1-p_1$. Если $p_1 f_1(y) - p_2 f_2(y)>0$, то более вероятно состояние *1*, в противном случае более вероятно со-

стояние *2*. После изменения знака этого выражения целесообразно подсчитать вероятности *P(1)* и *P(2)* существования состояний 1 и 2 по формулам:

$$P(1) = \frac{p_1 f_1(y)}{p_1 f_1(y) + p_2 f_2(y)},$$

$$P(2) = \frac{p_2 f_2(y)}{p_1 f_1(y) + p_2 f_2(y)}$$

и назначить момент переключения режима, когда вероятность перехода печи в состояние *2* достаточно велика.

Для повышения достоверности идентификации может использоваться несколько контролируемых параметров. Тогда после очередного измерения параметров y_i вычисляются условные плотности распределения вероятностей по каждому из параметров для смежных интервалов $f_1(y_i)$ и $f_2(y_i)$. Если параметры y_i взаимно независимы, можно подсчитать полные условные плотности распределения вероятностей существования того или иного состояния, которые обозначим $P_1(Y)$ и $P_2(Y)$

$$P_1(Y) = \prod_{i=1}^{n} f_1(y_i), \quad P_2(Y) = \prod_{i=1}^{n} f_1(y_i),$$

и использовать их вместо условных плотностей в приведённых выше формулах для расчёта вероятностей состояний *1* и *2*.

§ 9. Управление с обучением (автоматическая абразивная обработка)

Одна из проблем автоматизации зачистки заключается в следующем. При сборке отдельные элементы формы (верхняя и нижняя полуформы, отдельные стержни) могут оказаться смещёнными по отношению друг к другу на доли миллиметра. Такие смещения обычно не позволяют автоматически (на оборудовании, работающем по жёстким упорам или по жёстким программам) качественно выполнить зачистку облоя. Требуется или оставлять заусенцы высотой больше, чем возможные смещения, либо удалять большие объёмы металла со смещённых поверхностей, либо выполнять ручную доработку отливок, или же предъявлять очень высокие требования к точности оснастки.

Ниже описано одно из возможных решений этой задачи. Оно предусматривает автоматическую зачистку отливки на одной позиции последовательно по нескольким прямолинейным и криволинейным поверхностям и частично воспроизводит ручную зачистку на абра-

зивном круге. В то же время здесь используется главная идея обрабатывающих центров – сохранение исходной базы механической обработки в процессе всей обработки. Такой подход к автоматизации абразивной зачистки является альтернативным по отношению к широко применяемой в массовом производстве обработке отливок на однопозиционных станках или многопозиционных автоматических линиях абразивной зачистки (с обработкой на каждой позиции 1 цилиндрической или 1–3 плоских поверхностей).

Обработка выполняется по программе, которая формируется в процессе обработки первой отливки при ручном управлении. На рис. 8.35,а показана схема установки кондуктора с отливкой в приспособлении станка, на рис. 8.35,б – схема координат, по которым производятся перемещения инструмента и приспособления с отливкой.

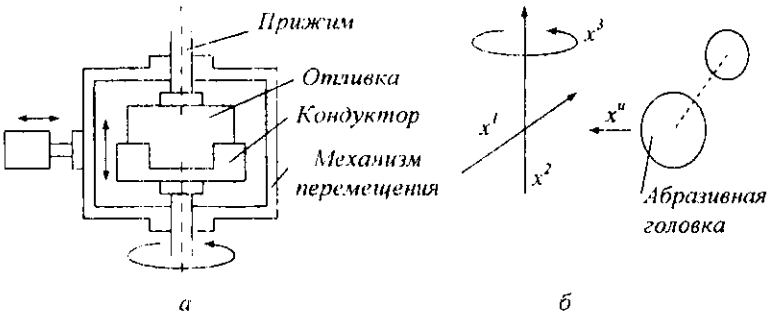


Рис. 8.35

Отливка вне позиции обработки устанавливается в один из кондукторов транспортной системы и подаётся ею на позицию обработки. Здесь отливка с кондуктором зажимается в приспособлении, которое обеспечивает перемещение отливки в процессе зачистки по осям x^1, x^2 и вращение вокруг оси x^3. Программа формируется при обработке первой отливки с ручным управлением перемещениями отливки и абразивной головки.

Алгоритмы формирования программы при обработке первой отливки и последующей автоматической обработки отливок представлены на рис. 8.36.

Особенность формирования программы при этом обучении заключается в специальной организации алгоритма обработки, которая позволяет компенсировать погрешности геометрии отливки, вызванные смещениями элементов литейной формы и стержней относитель-

но друг друга, возникающие при сборке и заливке формы, а также износ абразивного круга.

Для этого обработка как при обучении, так и в дальнейшем, ведётся поочерёдно по отдельным фрагментам поверхности, образуемым одним и тем же элементом формы (например, верхней полуформой, одним из стержней), с предварительным определением положения этой поверхности относительно баз обработки.

При обучении (рис. 8.36,а) перед началом обработки очередного i-го фрагмента поверхности определяется её положение. Для этого отливка несколько раз ($j = 1 \ldots m_i$) устанавливается в некоторые положения x^1_{ji}, x^2_{ji}, x^3_{ji}, которые, по мнению обучающего оператора, достаточно точно характеризуют положение и направления возможных смещений m_i-го фрагмента. Затем инструмент каждый раз перемещается до соприкосновения с отливкой. Координаты x^1_{ji}, x^2_{ji}, x^3_{ji} и x^u_{ji} запоминаются.

При ручном управлении движениями отливки x^1, x^2, x^3 и инструмента x^u производится обработка i-го фрагмента поверхности. При этом запоминаются изменения координат x^1, x^2, x^3 и x^u как функции времени. Затем следует переход к измерению и обработке следующего фрагмента.

При автоматической обработке отливок (рис. 8.36,б) установка приспособления в положение x^1_{ji}, x^2_{ji}, x^3_{ji} производится автоматически по запомненным при обучении значениям, и головка перемещается до соприкосновения с отливкой. Момент соприкосновения фиксируется датчиком, и координата x^u_{ji} запоминается. По окончании измерений для всех m_i точек i-го фрагмента вычисляется скорректированный закон перемещения обрабатывающей головки (который учитывает смещение этой поверхности в данной отливке по отношению к базовым поверхностям и износ круга в данный момент времени), и производится обработка очередного фрагмента поверхности.

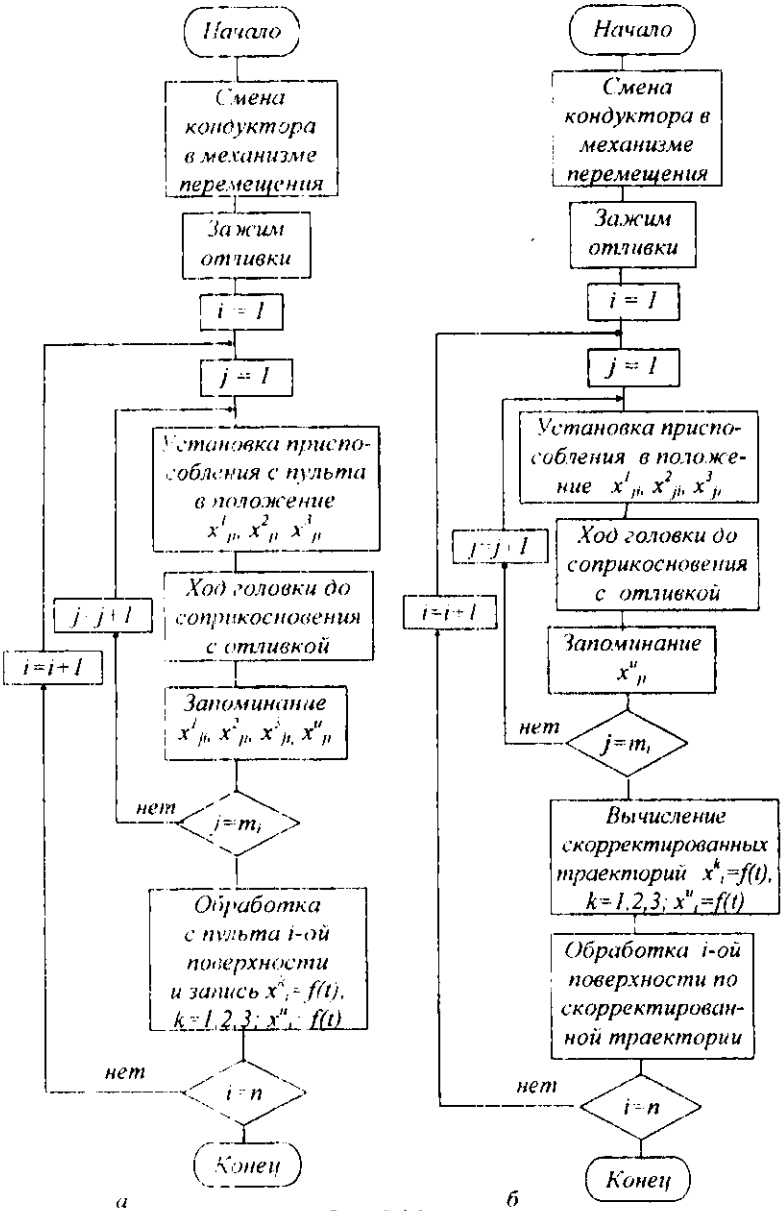

Начало
Смена кондуктора в механизме перемещения
Зажим отливки
i = 1
j = 1
Установка приспособления с пульта в положение $x^1_{jp}, x^2_{jp}, x^3_{jp}$
Ход головки до соприкосновения с отливкой
Запоминание $x^1_{jp}, x^2_{jp}, x^3_{jp}, x^u_{jp}$
j = j + 1
нет
j=m_i
i=i+1
Обработка с пульта i-ой поверхности и запись $x^k_i = f(t)$, $k = 1,2,3$; $x^u_i = f(t)$
нет
i = n
Конец
а
Начало
Смена кондуктора в механизме перемещения
Зажим отливки
i = 1
j = 1
Установка приспособления в положение $x^1_{jp}, x^2_{jp}, x^3_{jp}$
j = j + 1
Ход головки до соприкосновения с отливкой
Запоминание x^u_{jp}
i=i+1
нет
j=m_i
Вычисление скорректированных траекторий $x^k_i = f(t)$, $k = 1,2,3$; $x^u_i = f(t)$
Обработка i-ой поверхности по скорректированной траектории
нет
i = n
Конец
б

Рис. 8.36

§ 10. Управление на основе математической модели процесса (оболочковая форма)

Для решения сложных задач управления создаётся математическая модель объекта управления, то есть устанавливается математическая зависимость между выходными параметрами, управляющими и возмущающими воздействиями. В модель вводятся сложившиеся к текущему моменту времени условия и в результате решения определяются необходимые управляющие воздействия.

Модель управляемого объекта может быть получена теоретическим или экспериментальным путём либо при статистической обработке данных об эксплуатации объекта управления. В двух последних случаях модели обычно являются статистическими.

Задача теоретической модели – получение математических зависимостей между параметрами процесса, хотя бы только в *параметрической* форме, то есть без указания числовых значений параметров. Другими словами, она должна выявить только *структуру* зависимостей. Числовые значения могут определяться опытным путём при отработке процесса.

Ниже описан пример получения и использования теоретической модели. Получение статистической модели экспериментальным путём описано в §12 «*Статистические модели. Оптимизация. Управление качеством формовочной смеси*».

Задача управления процессом формирования оболочковой формы

Толщина оболочки при получении оболочковых форм и стержней методом свободной засыпки зависит от температуры модели, времени выдержки смеси на модели (времени формирования оболочки) и свойств связующего. Возможные колебания этих параметров в ходе производственного процесса вынуждают выполнять настройку режима машины таким образом, чтобы при любых ситуациях оболочка имела гарантированно толщину больше минимально допустимой. При этом большинство форм оказывается толще, чем необходимо. Это вызывает перерасход смеси. Основная причина нестабильной толщины формы кроется в колебаниях температуры модели, так как тепловая инерция объекта обычно достаточно велика и система регулирования (стабилизации) температуры не успевает быстро среагировать на изменяющиеся условия.

Идея стабилизации толщины оболочки заключается в том, чтобы при снижении температуры модели увеличивать время формирования оболочки, а при её повышении – уменьшать его. Поскольку зависимость

толщины оболочки от температуры и времени её формирования достаточно сложна, для управления процессом целесообразно использовать математическую модель и применить вычислительную технику.

В процессе отверждения песчано-смоляной смеси происходит поликонденсация связующего – смолы. При этом молекулы исходного вещества смолы (мономолекулы) или частично полимеризированного вещества, имеющие реакционно-способные группы (активные центры), соединяются друг с другом и образуют более длинные и связанные между собой полимерные цепочки. При этом смола твердеет и соединяет зёрна песка. Для того чтобы после сбрасывания излишка смеси с модели на ней остался слой (оболочка) заданной толщины, в этом слое должно прореагировать достаточно большое число реакционно-способных групп и образовать соответствующее количество связей между полимерными молекулами смолы.

Обозначим начальную концентрацию реакционно-способных групп через C_{0p}, а их концентрацию в текущий момент времени τ при формировании оболочки через C_p.

Процесс твердения оболочки можно считать законченным, когда C_p достигнет заданной величины. Для момента окончания формирования оболочки можно принять:

$$C_p = (5\% - 15\%)\, C_{0p}.$$

Коэффициентом полноты реакции полимеризации называется величина

$$\beta = (C_{0p} - C_p)/ C_{0p}.$$

В начале процесса $\beta = 0$, в конце $\beta = 85\% - 95\%$. Таким образом, для управления процессом формирования оболочки надо найти зависимость

$$C_p = (t_м,\ \tau,\ a) \text{ или } \beta = \beta\,(t_м,\ \tau,\ a),$$

где $t_м$ - температура модели; τ – время формирования оболочки, a – некоторые свойства связующего (пока неизвестные).

Аналитический расчёт реакции поликонденсации связующего

Процесс поликонденсации связующего (смолы) происходит в тонких плёнках связующего, покрывающего зёрна песка. При этом внутри плёнок отсутствуют какие-либо поверхности раздела и процесс происходит сразу во всём объёме этой плёнки. Поэтому реакцию в первом приближении можно рассматривать как гомогенную (хотя то обстоятельство, что реакционно-способные группы, входящие в состав длинных полимерных молекул, теряют возможность свободно перемещаться в окружающей среде, существенно осложняет расчёт). Запишем эту реакцию так:

$$n\mathrm{R}\text{-}\mathrm{M}.\ \mathrm{P} \xrightarrow{\kappa} p\mathrm{P} + q\mathrm{H_2O},$$

где M – молекула мономера; P – молекула полимера; R – радикал, образованный из молекулы мономера или входящий в состав полимера, имеющий реакционно-способную группу; κ – константа скорости реакции; n, m, p, q – стехиометрические коэффициенты реакции (они пока неизвестны, ввиду переменной длины полимерных молекул могут быть некоторыми усреднёнными величинами). Запись показывает, что радикал, соединяясь с молекулой мономера или полимера, превращается в полимер с выделением воды.

По закону действия масс скорость химической реакции при постоянной температуре пропорциональна произведению концентраций реагирующих веществ, взятых в степенях, равных коэффициентам, стоящим перед формулой данного вещества в уравнении реакции. Коэффициент пропорциональности называется константой скорости реакции.

Выражение для скорости v этой реакции имеет вид:

$$v = k \cdot C_p^n \cdot C_1^m \cdot C_2^p C_{H_2O}^q,$$

где k – константа скорости реакции; C_p, C_1, C_2, C_{H_2O} – соответственно концентрации радикалов, в том числе и входящих в состав полимерных молекул, мономолекул или звеньев полимерных молекул, имеющих двойные (ненасыщенные) связи в левой (C_1) и правой (C_2) частях уравнения, и воды.

Влияние температуры на скорость реакции можно ввести на основе уравнения Аррениуса, устанавливающего зависимость константы скорости реакции от температуры:

$$k = k_0 \cdot e^{-\frac{E}{RT}},$$

где E – энергия активации; T – абсолютная температура; R – универсальная газовая постоянная; k_0 – коэффициент пропорциональности.

В написанной выше реакции одним компонентом являются радикалы, в том числе и входящие в состав полимерных молекул, с концентрацией C_p. Другой компонент – любая молекула М или Р (точнее, любое звено молекулы), куда может подсоединиться реакционно-способная группа. В ходе реакции М → Р концентрация этих звеньев почти не меняется (по крайней мере для некоторых из применяемых смол), и допустимо принять $C_1 \sim const$. То же самое можно сказать о концентрации C_2 молекул полимера, стоящих в правой части реакции. Выделяющиеся в ходе реакции пары воды имеют возможность выхо-

дить из тонких оболочек связующего, обволакивающих зерна песка, в межпоровое пространство смеси, и поэтому для оценочного расчета можно принять $C_{H_2O} = const$.

Постоянные величины, входящие в выражение для скорости реакции, можно ввести в коэффициент реакции. Тогда получим:

$$v = k^1 \cdot C_p^n,$$

где $k^1 = k \cdot C_1^m \cdot C_2^p \cdot C_{H_2O}^q$.

Имея в виду, что скоростью реакции в гомогенной системе называется скорость изменения концентрации какого-либо из веществ, вступающих в реакцию или образующихся при реакции, происходящее за единицу времени, то есть $v = \frac{dC_p}{d\tau}$, можно окончательно записать:

$$\frac{dC_p}{d\tau} = k_0^1 \cdot C_p^n \cdot e^{-\frac{E}{RT}},$$

где константа $k_0^1 = k_0 \cdot C_1^m \cdot C_2^p \cdot C_{H_2O}^q$.

В этом уравнении можно разделить переменные C_p и τ и интегрировать: левую часть от C_0 до текущего значения C_p, а правую часть – от 0 до τ:

$$\int_{C_{0p}}^{C_p} C_p^{-n} dC_p = k_0^1 \int_0^{\tau} e^{-\frac{E}{RT}} \cdot d\tau.$$

Для определения коэффициента n были проведены опыты по изотермическому $(T = const)$ отверждению фенолоформальдегидной смолы. Смола отверждалась до величин $\beta = 0{,}85;\ 0{,}9$ и $0{,}95$. Результаты были сопоставлены с решениями, полученными теоретически. Они близко соответствовали тем, которые были вычислены при $n = 2$. Это значение и было принято в дальнейшей работе.

После интегрирования левой части и несложных преобразований получаем:

$$\beta = \frac{A(T,\tau)}{1 + A(T,\tau)},$$

где $A(T,\tau) = C_{0p} \cdot k_0^1 \int_0^{\tau} e^{-\frac{k}{RT}} d\tau.$

Таким образом, чтобы найти коэффициент поликонденсации в какой-то области оболочки, надо знать характер изменения температуры в этой области с начала процесса отверждения до текущего момента времени.

Нагрев песчано-смоляной смеси

Для формирования оболочковой формы на нагретую модельную плиту засыпается песчано-смоляная смесь. При этом на поверхности контакта смеси с моделью устанавливается некоторая (в начале процесса постоянная) температура, в дальнейшем температура модели несколько снижается, а смесь нагревается. На рис. 8.37 показан этот процесс и обозначено: $T_{0м}$ и $T_{0с}$ – начальные температуры модели и смеси, T_0 – температура на поверхности контакта модели со смесью, x – расстояние от поверхности модельной плиты, δ – требуемая толщина оболочковой формы, *1, 2, 3* – распределение температуры в смеси в моменты времени τ_1, τ_2, τ_3, причём $\tau_1 < \tau_2 < \tau_3$. На расстоянии δ от поверхности модели надо получить заданное значение коэффициента полноты полимеризации β_n, а при его достижении закончить процесс и сбросить оставшуюся смесь с модели.

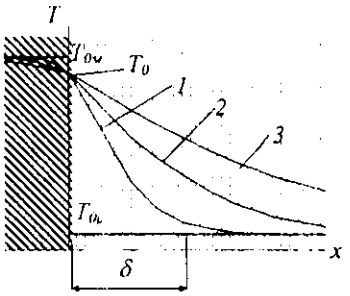


Рис. 8.37

Если приближённо считать поверхность модели плоской, то распределение температуры в смеси описывается решением одномерного уравнения теплопроводности Фурье:

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} a \frac{\partial^2 T}{\partial x^2},$$

где a – температуропроводность смеси,

при следующих краевых условиях:

$T(x,0) = T_{0с}$ – начальная температура смеси;

$T(0, \tau) = T_0 = const$ – температура на поверхности контакта смеси с моделью;

$\frac{\partial T(\infty, \tau)}{\partial x} = 0$ – производная температуры на свободной поверхности смеси.

Такая задача легко решается численными методами на ЭВМ. В результате можно получить распределение температуры в смеси в каждый момент времени от 0 до текущего момента, определять темпе-

ратуру $T = f(T_0, \delta, \tau)$, на каждом шаге расчёта вычислять значение интеграла

$$C_0 \cdot k_0^1 \cdot \left(\int_0^{\tau} e^{-\frac{E}{RT}} d\tau + \int_{\tau}^{\tau+\Delta\tau} e^{-\frac{E}{RT}} d\tau \right) = A(T,\tau) + \Delta A(T,\tau)$$

и определять величину β на заданном расстоянии δ в текущий момент времени.

Алгоритм управления формированием оболочки

Программа управления толщиной оболочки (рис. 8.38) запускается при засыпке смеси на плиту. Она опрашивает датчик температуры в модельной плите и таймер, фиксируя температуру плиты T_0 и запоминая действительный начальный момент времени $\tau_0 = \tau_м$, где $\tau_м$ – значение, полученное с таймера. Затем начинается пошаговое (с шагом по времени $\Delta\tau$) численное решение дифференциального уравнения теплопроводности для определения температуры в смеси на расстоянии δ от поверхности модельной плиты $T_\delta = f(T_0, \delta, \tau)$.

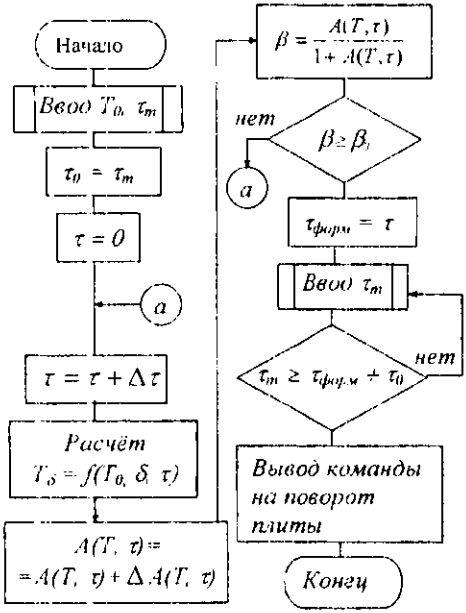


Рис. 8.38

В конце каждого шага производится расчёт интеграла $A(T, \tau) + \Delta A(T, \tau)$, величины β и проверяется достижение заданной степени полимеризации. Пошаговый расчёт температуры и коэффициента β повторяется до получения заданной величины $\beta = \beta_з$. Полученное при этом время является расчётным временем формирования оболочки $\tau_{форм}$. Затем программа опрашивает таймер и определяет действительное время формирования оболочки, а при достижении рассчитанного времени выдаёт команду на окончание процесса.

§11. Заливка металла

Технологические требования к заливке

Одной из самых сложных и очень специфических задач в литейном производстве является автоматизация заливки. Здесь предлагаются, разрабатываются и применяются различные методы стабилизирующего, программного и следящего регулирования, и «обучение» системы управления при ручной заливке первых форм. Кроме того, используются различные технологические и конструкторские решения, направленные на упрощение задач управления.

При заливке необходимо обеспечить постоянный уровень металла в стояке или литниковой чаше. Перелив металла приводит к заливу верхней поверхности литейной формы и может вывести из строя опоку или механизмы формовочной линии. Снижение этого уровня уменьшает скорость заполнения формы. При этом металл может затвердеть в тонких сечениях еще до заполнения полости формы, могут образоваться затвердевшие «мосты» в вертикальных стенках, а шлак, скапливающийся в верхней части шлакоуловителей, может проскочить в полость формы. Уровень металла в заливаемой литейной форме непрерывно изменяется. Соответственно, изменяется пропускная способность литниковой системы и необходимая скорость заливки.

Расход металла через литниковую систему при заливке (при постоянном уровне металла в чаше) графически отображен на рис. 8.39 (кривая 1). В первый момент заливки наблюдаем большой расход металла, при котором заполняется литниковая система. Затем некоторое время τ_1 заполняется нижняя (ниже уровня питателей) часть литейной полости, когда расход металла через литниковую систему остается постоянным.

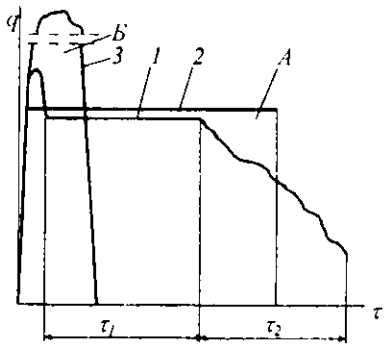


Рис. 8.39

При заполнении части формы, расположенной выше питателей (τ_2), происходит заполнение под непрерывно повышающийся уровень металла в форме, и пропускная способность литниковой системы уменьшается. Характер этого изменения зависит от конфигурации конкретной заливаемой отливки. «Противодавление» в литейной форме (то есть давление газов в полости формы, особенно если она не имеет выпоров), зависящее от газопроницаемости и влажности формовочной смеси, наличия зазора между полуформами, может существенно изменяться в разных формах даже для одной и той же отливки. Разная плотность набивки может вызвать разное раздутие, а следовательно, разную металлоемкость форм. Это еще больше осложняет задачу заливки.

Для упрощения сложных задач автоматической заливки используются различные технологические и конструктивные приёмы:

1. Литниковые чаши повышенной ёмкости.

2. Использование промежуточного ковша.

3. Заливка под низким давлением.

Существуют и «прямые» методы регулирования расхода подаваемого в форму металла, обеспечивающие примерно постоянный уровень металла в стояке при заливке.

Литниковые чаши повышенной емкости

Литниковые чаши повышенной ёмкости (со значительно большим поперечным сечением в горизонтальной плоскости по сравнению с поперечным сечением стояка или воронки) снижают скорость изменения уровня в чаше и требования к точности работы системы автоматического регулирования уровня, так как вмещают излишек металла, возникающий при больших ошибках системы регулирования уровня. Кроме того, они позволяют заменить задачу регулирования расхода по положению уровня металла в стояке (то есть задачу следящей системы $q = f(h_{ист})$) значительно более простой задачей стабилизации расхода металла из дозатора ($q = const$). На рис. 8.39 кривая *2* соответствует расходу металла из заливочного устройства, обеспечивающего постоянный расход. После заполнения литниковой системы кривая *2* идёт несколько выше кривой *1*, гарантируя наличие некоторого количества металла в литниковой чаше, а при заполнении верхней части формы (в период τ_2) объём металла в литниковой чаше всё время увеличивается. Площадь *A* между кривыми *1* и *2* представляет количество металла, находящегося в литниковой чаше, и определяет необходимую её ёмкость. Строго говоря, при заливке в большую чашу постоянный расход по технологиче-

ским соображениям не требуется, лишь бы в ней все время оставался металл.

Использование промежуточного ковша

При использовании промежуточного ковша регулирование расхода металла заменяется дозированием (в литье под давлением таким «ковшом» является камера прессования машины). Это более простая задача. Применяется дозирование по весу, по объёму и по времени. В последнем случае для точного дозирования надо обеспечить постоянный расход металла.

Простейшим средством объемного дозирования металла является заливочная ложка литейщика на машинах литья под давлением и кокильного литья при литье цветных сплавов. На рис. 8.40 показаны различные способы объёмного дозирования металла. На машинах литья под давлением часто применяются заливочные устройства ковшового типа (рис. 8.40,а). Ковш имеет узкую боковую прорезь *а*, через которую в него попадает металл. Узкая прорезь ограничивает попадание в ковш и отливку окисной пленки, образующейся на поверхности алюминиевого сплава. Ковш погружается в жидкий металл на постоянную глубину, которая определяется датчиком уровня *2*. Иногда таким датчиком является стержень из электропроводного и несмачиваемого сплавом материала, а его сигналом – замыкание электрической цепи между датчиком и поверхностью ванны металла. Затем ковш поворачивается на некоторый угол для удержания порции металла в нем и переносится к камере прессования машины, в которую и заливает дозу металла.

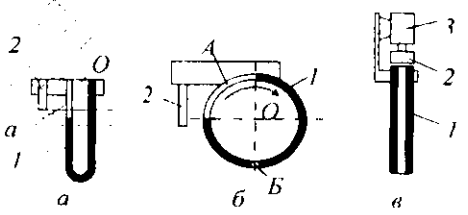


Рис. 8.40

На рис. 8.40,б показана несколько другая конструкция подобного устройства. Оно предназначено для заливки сравнительно крупных доз алюминиевого сплава (до 20 кг) на карусельной кокильной машине. Ковш *1* имеет шарообразную форму с вырезанным сектором *А* и вращается вокруг оси *О*. При опускании ковша в раздаточную печь до касания датчиком уровня *2* поверхности металла через отверстие *Б* в нижней час-

ти ковша в него поступает жидкий металл.[1] Такое заполнение предотвращает попадание окисной плены с поверхности ванны в ковш. Затем ковш поворачивается вокруг оси О по стрелке на 90 градусов (при этом отверстие Б выходит из расплава) и поднимается. После этого он перемещается к карусельной машине и выливает порцию металла в чашу большой емкости.

Оригинальный способ объемного дозирования применен для заливки очень маленьких доз металла (20 г) на машине жидкой штамповки тормозных цилиндров (рис. 8.40,в). Трубка 1 с открытыми верхним и нижним торцами (или с отверстием в нижнем торце) опускается в ванну с жидким сплавом. Затем верхний торец закрывается крышкой 2, приводимой в движение пневмоцилиндром 3, и трубка поднимается из металла. За счет небольшого разряжения в трубке и сил поверхностного натяжения жидкого сплава в трубке остается некоторое количество жидкого металла. Трубка переносится к матрице штампа, где цилиндр поднимает крышку, и порция металла сливается в матрицу. Устройство обеспечивает быструю заливку и высокую производительность машины жидкой штамповки.

Для дозирования чугуна может применяться дозирование по весу (в ковшах для чугуна трудно выдержать геометрические размеры полости для металла при частых заменах футеровки). Промежуточный ковш, обычно конический или чайниковый, заливается из раздаточной печи, причем при заливке он взвешивается, затем транспортируется к линии заливки и там заливает литейную форму.

Ковш небольшой емкости применяется для заливки только одной формы. Причина в том, что сам ковш с футеровкой имеет большой вес, и при использовании большого ковша трудно уловить изменение его веса при взвешивании одной порции металла. Например, если взвешивается доза металла в 20 кг из ковша емкостью 500 кг, причем сам ковш весит 300 кг, то, чтобы получить точность дозы 1% (0,2 кг), надо провести взвешивание ковша с точностью до 0,02%.

Дозирование по времени проводится при постоянном расходе металла. Только в этом случае можно получить определенную дозу металла G:

$$G = q\,\tau,$$

где τ – время дозирования; q – расход металла.

Одно из первых устройств для получения постоянного расхода – секторный ковш (рис. 8.41).

---

[1] Привод вращения ковша, размещенный на оси О, в металл не погружается.

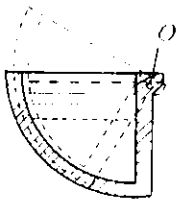


Рис. 8.41

Секторным ковш назван так потому, что внутренняя поверхность ковша образована вращением плоской фигуры, обычно квадрата, вокруг оси поворота ковша О и описывает при этом некоторый сектор тела вращения. На этой же оси находится сливной носок. При постоянной скорости поворота ковша металл из него выдается с постоянным расходом. Такие ковши применяются для литья длинных труб центробежным способом, где требуется по возможности равномерно распределить металл по длине изложницы. При заливке трубы тележка с секторным ковшом и заливочным желобом движется вдоль изложницы и производит заливку.

Для получения различных режимов заливки применяются специальные заливочные установки.

Заливочные установки

На рис. 8.42 представлена схема пневматического заливочного устройства для алюминиевых сплавов, в котором постоянный расход во время заливки формы обеспечивается поддержанием постоянного напора (над уровнем линии слива а) в раздаточной печи. Печь 1 герметично закрывается крышкой 2. Слева расположена заливочная горловина, закрываемая крышкой 3. Уровень металла в установке контролируется одним или двумя датчиками уровня (на схеме не показаны). Один датчик контролирует максимально допустимый уровень, и по его сигналу заливка дозатора для его пополнения должна быть прекращена. Другой датчик контролирует минимально допустимый уровень, и по его сигналу должно быть прекращено дозирование сплава из установки, а дозатор следует пополнить.

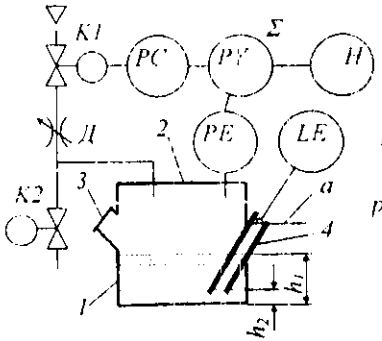


Рис. 8.42

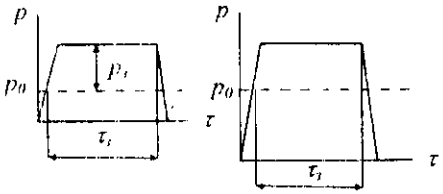


Рис. 8.43

В ванну жидкого металла опущен металлопровод *4*. В печи может быть создано повышенное давление воздуха при подаче в нее сжатого воздуха (воздух, подаваемый в дозатор, должен быть осушен) при открытии запорного клапана *К 1*. При повышении давления над поверхностью ванны жидкого металла уровень металла в трубопроводе поднимается, а в печи понижается. Дроссель *Д* служит для регулирования скорости подъема давления в печи и соответственно скорости подъема металла в металлопроводе при заливке. Для сброса давления из печи открывается клапан *К 2*.

Часть системы автоматизации дозатора, относящаяся к регулированию давления в нем, приведена на рис. 8.42.

Особенностью подобных установок является изменение начального уровня металла в печи в ходе разливки металла из нее (от первой разливаемой дозы при уровне металла h_1 до последней при уровне металла h_2).

Графики давления в печи при заливке первой и последней дозы показаны на рис. 8.43, а алгоритм программы цикла заливки – на рис. 8.44.

В начале заливки клапан *К 1* открывается, а клапан *К 2* закрывается. Металл поднимается по металлопроводу. Момент появления металла в выходном отверстии металлопровода фиксируется датчиком уровня LE, который может представлять собой электрический контакт, замыкаемый струей металла, чувствительную термопару, фотоэлемент или индукционный датчик. По сигналу этого датчика устройство *PY* суммирует показание датчика давления *PE*, измеряющего давление p_0 над поверхностью жидкого металла в дозаторе (таким образом фиксируется величина давления, необходимого для подъёма металла на уровень слива а), с давлением p_a, задаваемым задатчиком *H*. Он задает необходимую величину давления над линией слива p_a, то есть ту величину, под действием которой будет происходить истечение металла из металлопровода.

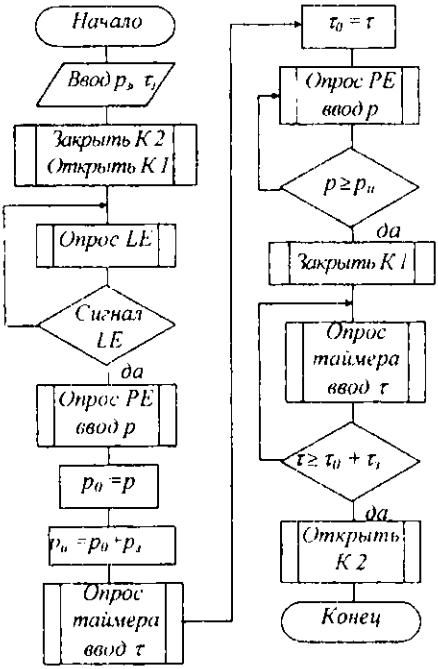


Рис. 8.44

Отсчет действующего при заливке давления от линии слива *а* устраняет влияние переменного уровня металла в печи на дозу металла и работу системы дозирования.

Результат суммирования является заданием для прибора с позиционным регулирующим устройством *РС*, и при достижении этого давления он выключает клапан *К 1* и прекращает подачу воздуха в печь.

Затем управление заливкой может осуществляться по двум вариантам. По первому варианту система регулирования может выполнять стабилизирующее регулирование, открывая клапан *К 1* при снижении давления в печи или сбрасывая излишек давления, который может появиться из-за нагрева холодного воздуха, поступившего в печь, открытием клапана *К 2*. Иногда воздух в печь подается не прямо в пространство над ванной жидкого металла, а в пространство между кожухом печи и пористой футеровкой верхней части печи. Проходя через горячую футеровку, воздух быстро нагревается, поэтому в последующей части цикла заливки температура воздуха и давление в печи меняются незначительно, и дальнейшего регулирования давления в этом цикле заливки не требуется. По истечении заданного времени заливки открывается клапан *К 2* и сбрасывает давление. Заливка закончена.

Заливочные установки (дозаторы) для чугуна конструктивно отличаются от дозаторов алюминиевых сплавов. Ввиду более высокой температуры затвердевания чугун трудно поддерживать в жидком состоянии в металлопроводе заливочного устройства, представляющем собой стальную трубу диаметром менее 100 мм. Кроме того, шлак, всплывая в жидком сплаве, может закупорить выпускное отверстие металлопровода. В конструкции установки предусмотрена возможность механического удаления шлака с поверхностей, контактирующих с жидким металлом.

На рис. 8.45 изображена конструкция дозатора для заливки чугуна. Печь *1* с индукционным подогревом имеет футерованный огнеупорным материалом сифон *2* (заливочный сифон) достаточно большого диаметра с расширением (зумпфом) *3* в верхней части, открытым сверху. Для заливки металла в дозатор предназначен приемный сифон *4*. При работе дозатора он не закрывается крышкой, поэтому при подаче давления на поверхность ванны жидкого металла *а* в дозаторе уровень металла поднимается как в заливочном, так и в приемном сифонах. Такая конструкция дозатора обеспечивает удобное обслуживание и хороший доступ ко всем футерованным поверхностям, облегчая их осмотр и удаление шлака. При разливке подряд нескольких порций металла уровень металла в зумпфе не опускается, а поддерживается постоянным. Он контролируется датчиком уровня *5* и регулируется САР, аналогичной САР регулирования давления (см. рис. 8.42).

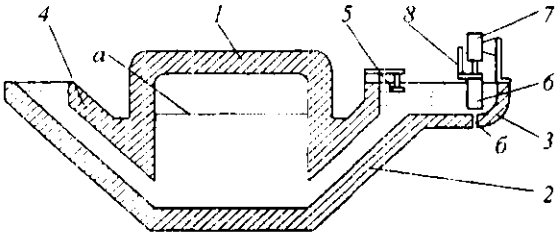


Рис. 8.45

Используются поплавковые или ультразвуковые уровнемеры.

Заливка форм производится через отверстие *б*, находящееся в днище зумпфа, закрываемое стопором *6*. Стопор перемещается цилиндром *7* с пневмогидравлическим приводом, а положение стопора контролируется датчиком положения *8*.

Расход металла через стопорное отверстие определяется его диаметром, а также величиной зазора между этим отверстием и стопором. Расход металла можно уменьшить, приближая стопор к стопорному отверстию.

Если производится разливка чугуна, обработанного магнием, то для сокращения расхода магния и уменьшения шлакообразования в ванне дозатора предпочтительно в его пневмосистеме вместо воздуха использовать инертный газ, например азот.

Надо заметить, что при ручной или механизированной заливке чугуна применяются конические или чайниковые ковши. Стопорные ковши менее надежны и требуют большого ухода при эксплуатации. Тем не менее, для автоматической заливки чугуна чаще используются стопорные ковши. Это вызвано необходимостью получить более приемлемые динамические характеристики соответствующей САР. Если расход металла регулируется в выпускном отверстии дозатора, а результат регулирования определяется по уровню металла в форме (то есть имеет место типичное регулирование по отклонению), то длина струи между начальным и конечным сечениями этой струи определяет время запаздывания САР. Чем длиннее струя, тем позже будет обнаружено возникшее отклонение. При заливке из конического или чайникового ковша стремятся держать носок ковша по возможности ближе к литниковой чаше или воронке. Однако при заполнении форм с воронкой, размещенной в центре опоки, ковш приходится держать довольно высоко и работать с длинной струей. Кроме того, отказ от стопора и попытка регулировать расход уровнем металла в заливочном зумпфе приводит к очень инерционной системе, в которую будет включаться и большая масса металла, движущегося в заливочном сифоне установки. Очень важно также и то, что многократно повторяющееся перемещение поверхности жидкого металла вдоль футерованных стен печи, происходящее при заливке каждой формы, вызывает их энергичное ошлаковывание. Использование стопорного механизма позволяет при разливке всего содержимого дозатора поддерживать постоянный уровень металла в заливочном сифоне, а не опускать его после каждой заливки. При таком способе работы сокращается расход инертного газа, если он применяется.

Регулирование расхода металла

Дозатор, показанный на рис. 8.45, применяется и при дозировании металла в промежуточный ковш, и при заливке с постоянным расходом форм, имеющих увеличенную литниковую чашу. Кроме того, может использоваться для программной заливки с обучением при ручном управлении стопором во время заливки первых форм и при заливке форм с регулированием расхода по уровню металла в литниковой чаше.

При заливке с обучением первые формы заполняются заливщиком, который вручную управляет перемещением стопора. Это перемещение, фиксируемое датчиком положения *8* (см. рис. 8.45), записывается в управляющую программу. Затем программа реализуется при автоматической заливке форм.

Выше упоминалось, что заполнение даже одинаковых форм, полученных одна за другой на одной машине, может отличаться. В связи с этим режим заливки с обучением может оказаться неэффективным.

Заливка с управлением расходом по уровню металла в литниковой чаше устраняет все эти проблемы, но условия работы такой САР весьма тяжелые. Для успешного регулирования заливки по уровню требуется малая инерционность объекта регулирования (заливочного устройства) высокое быстродействие САР, по возможности более медленное изменение уровня металла в чаше (хотя именно при малых чашах этот метод считается предпочтительным).

Рис. 8.46

Тяжелые условия работы САР по уровню иллюстрирует график перемещения стопора при заливке одной формы (рис. 8.46). Видны резкие регулирующие воздействия стопора: скорости, соизмеримые с максимальной скоростью стопора при открытии в начальный момент и перемещения, составляющие до 30% от максимального хода при открытии.

При автоматическом регулировании расхода по уровню металла в стояке необходимо измерить этот уровень.

Для контроля уровня металла в стояке испытывались различные датчики. Один из реализованных методов контроля заключается в следующем. Через видеокамеру *1* (рис. 8.47,а), установленную под некоторым углом к струе металла *3*, ведется наблюдение за поверхностью металла в литниковой чаше *2*. Полученное изображение анализируется *системой технического зрения*. На рис. 8.47,б изображена поверхность при низком (*1*) и высоком (*2*) уровне металла. Вычислительная система подсчитывает площадь, занимаемую видимой поверхностью металла, и в зависимости от этого производит регулирующие воздействия на привод стопора.

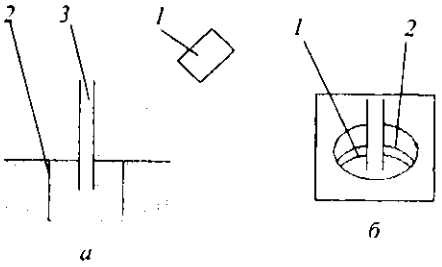


Рис. 8.47

Контролировать уровень металла в литниковой чаше можно с помощью лазерного датчика (см. рис. 3.12). Литниковая чаша имеет специальный прилив. Появление в нём металла (при слишком высоком уровне) фиксируется приёмником излучения от источника света, при этом стопорный механизм получает команду на снижение расхода.

Для заливки используются также магнитодинамические насосы (МДН). Они представляют собой индукционные печи с каналами специальной конструкции и несколькими магнитопроводами и обмотками. Переменный ток, протекающий по обмоткам, индуцирует в каналах печи, заполненных жидким металлом, электрический ток (разогревающий жидкий металл). При взаимодействии этих токов в жидком металле возникает повышенное давление, которое при небольших токах вызывает движение металла с небольшой скоростью и используется для перемешивания металла в ванне печи. При повышении тока давление в металле возрастает, металл в канале печи поднимается на большую высоту и поступает на желоб, с которого и выдается для заливки формы.

Заливка под низким давлением

Метод литья под низким давлением может рассматриваться как дозирование металла непосредственно в литейной форме. Этот метод широко применяется при литье алюминиевых сплавов в металлические формы и для заливки песчано-глинистых форм на литейных автоматических линиях. Печь машины литья под низким давлением алюминиевых сплавов конструктивно похожа на дозатор алюминиевых сплавов (см. рис. 8.42), только металлопровод расположен вертикально, и на него устанавливается литейная форма. При литье алюминиевых сплавов в ме-

таллические формы (рис. 8.48,а) металл подводится в наиболее массивную часть отливки, которая размещается в нижней части формы.

а *б*

Рис. 8.48

Форма устанавливается на верхний торец металлопровода, погруженного нижним концом в жидкий металл, находящийся в печи низкого давления. Затем в печи повышается давление сжатого воздуха над поверхностью ванны металла (график давления показан на рис. 8.49), металл поднимается по металлопроводу вверх и заполняет полость формы. Скорость подъема уровня металла в форме примерно соответствует (если пренебречь колебаниями давления и скорости, возникающими в движущемся металле) скорости подъема давления в печи. После заполнения формы повышенное давление поддерживается некоторое время, чтобы отливка затвердела. Для обеспечения плавного заполнения полости формы давление в печи поднимается сравнительно медленно, с тем чтобы не получить в узких сечениях отливки высоких скоростей металла и захвата воздуха. При такой технологии заливки нижние части отливки и формы имеют более высокую температуру, чем верхние, и происходит направленное затвердевание отливки сверху вниз. После затвердевания отливки давление сбрасывается, и незатвердевший металл из литника и металлопровода сливается в печь. Давление в печи изменяется по графику (рис. 8.49), который предусматривает линейное повышение давления при заполнении формы, иногда скачкообразное его повышение в конце заполнения, затем выдержку для затвердевания отливки и сброс давления.

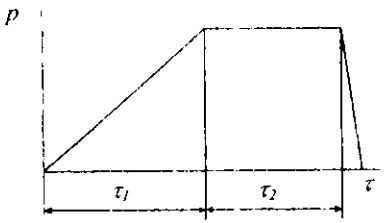


Рис. 8.49

Такой же метод заливки стал применяться и для заливки песчано-глинистых форм на литейном конвейере. Металл может подводиться в разъем формы в том же месте, куда он подводится стояком при гравитационной заливке, только снизу (рис. 8.48,б). Тогда при быстром подъеме давления (τ_1 на рис. 8.49 мало) заполнение формы происходит примерно так же, как при гравитационной заливке. Однако при заливке под низким давлением масса металла, движущаяся в металлопроводе, может быть существенно больше массы ме-

талла в струе при свободной заливке, что может привести к повреждениям формы при остановке потока. Можно использовать и медленную заливку, аналогичную применяемой при литье в металлические формы, с соответствующей переработкой литниковой системы. Ограничением здесь является время, отводимое для заливки одной формы. Для сокращения времени пребывания формы на позиции заливки предлагаются различные приёмы. Так, иногда форма имеет литниковую систему, у которой один из элементов размещен выше полости формы. После заливки металл спустя некоторое время сливается. Для большинства литейных сплавов более рациональна нижняя литниковая система. Чтобы сбросить давление в печи до затвердевания отливки (и перейти к заливке следующей формы), специальный механизм заливочной установки (пневмоцилиндр) смещает часть формы и закрывает заливочный канал песчаной пробкой.

§ 12. Статистические модели. Оптимизация. Управление качеством формовочной смеси

Управление по нескольким параметрам является наиболее сложным видом управления.

Один из методов решения такой задачи – «разделение» системы: выделяют регулирующие воздействия, влияющие на один из параметров. Например, отдельно регулируют влажность формовочной смеси добавкой воды, отдельно прочность добавкой бентонита, а уголь добавляют пропорционально бентониту (разрушение того и другого связано с глубиной прогрева и разрушением компонентов в прогретом слое).

Другой подход – в разработке математической модели объекта и использовании её для управления.

Задача получения качественной формовочной смеси является, вероятно, наиболее трудной, а с другой стороны, самой интересной в области проблем управления литейными процессами. При больших возможностях, предоставляемых вычислительной техникой, она может успешно решаться.

Наметим этапы её решения:

- Разработка модели смеси.
- Оптимизация состава и режимов получения смеси, обеспечивающих минимальный брак смеси по заданным свойствам.
- Статистический контроль свойств смеси и управление процессом по его результатам.

Модели смеси

Известно несколько видов моделей смеси.

Модель освежения. Она представляет собой перечень компонентов и их количеств, которые необходимо ввести в смеситель, чтобы компенсировать разрушенные при заливке материалы. Модель указывает также количество оборотной смеси, которое следует вывести из оборота в отвал, чтобы сохранить в ней (не превысить) допустимое содержание неактивных мелких частиц. Модель освежения строится на основе экспериментов или расчётов, в которых исследуется разрушение различных компонентов смеси при заливке отливок разной толщины (это влияет на глубину прогрева формы и на разрушение компонентов).

Модель «состав – свойства». Модель представляет собой функциональные зависимости требуемых свойств смеси от её состава и режимов приготовления.

Обычно такая модель строится на основе экспериментов и многомерного регрессионного анализа полученных данных. В результате регрессионного анализа получают искомые функциональные зависимости.

Различаются эксперименты *пассивные*, проводимые непосредственно в ходе работы изучаемой системы, при небольших «покачиваниях» состава смеси и режимов, и *активные*, то есть специально организуемые. Для сокращения количества опытов в последнем случае обычно используется *метод планирования экспериментов*.

Основные этапы исследования методом планирования экспериментов:

1. Выбор функций (откликов). Выбираются те свойства смеси, которые необходимо получить при приготовлении смеси.

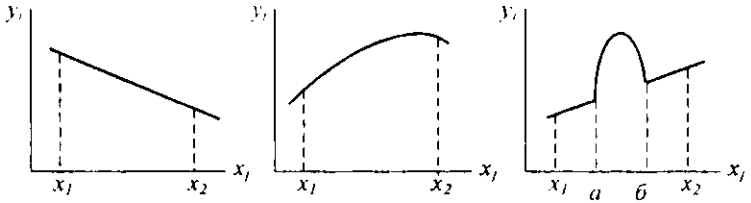
2. Выбор независимых переменных. Выбираются те переменные, которые могут изменяться в процессе приготовления смеси. К этим переменным относятся как количества разных компонентов, так и режимы получения смеси. Так, в одних случаях в их число может включаться время смешивания (если технологический процесс позволяет это время изменять), в других случаях это сделать невозможно.

Выбранный диапазон изменения независимых переменных должен удовлетворять следующим требованиям:

- Диапазон изменения независимых переменных в эксперименте должен перекрывать действительный диапазон их изменения при приготовлении смеси.

• Внутри этого диапазона не должно быть локальных изменений характера исследуемой зависимости. Если же такие изменения есть, то они должны учитываться моделью (например, можно её разделить на несколько частей).

На рис. 8.50,а предполагаемая зависимость свойства y_i от независимой переменной x_j является линейной и может быть описана линейной моделью.



а *б* *в*

Рис. 8.50

Зависимость на рис. 8.50,б может быть описана квадратичной моделью.

Для области [*а, б*] зависимости, представленной на рис. 8.50,в, надо строить отдельную модель.

Рассмотрим пример получения математической модели формовочной смеси «состав – свойства», разрабатываемой для управления процессом смесеприготовления с целью обеспечения заданных свойств смеси путём подбора соответствующего состава освежения и режимов её приготовления (по данным Пелых С.Г. и Семесенко М.П.). Основные этапы этой работы изложены ниже.

1. Требуется обеспечить заданные значения следующих свойств смеси[1]: прочности σ, газопроницаемости Γ и влажности W.

2. С учётом конкретных условий производства устанавливаются следующие независимые переменные: величина добавки свежего песка $c_{\text{П}}$ (от 0 до 5%), время перемешивания τ (от 20 до 100 с), количество глинистой суспензии $c_{\text{Г}}$ (от 2 до 6%), плотность этой суспензии δ (от 1050 до 1250 кг/м^3).

---

[1] Смесь, для которой разрабатывается модель, относится к классу низкопрочных, использует низкопрочную глину и по действующему на заводе СТП для неё требуется контроль газопроницаемости.

3. На основе предварительного анализа установлено, что зависимости заданных свойств смеси от выбранных независимых переменных достаточно точно могут быть описаны линейными или билинейными моделями, а отсутствие локальных изменений характера зависимостей внутри диапазонов изменения независимых переменных не требует уточнения модели (например, разделения её на несколько частей).

4. Проведены активные эксперименты с изменением количества компонентов и режимов во всех принятых для них диапазонах, с минимально необходимым (для выбранных типов моделей) количеством опытных точек.

5. Учитывая вероятностный характер измеряемых величин, измерения прочности и газопроницаемости в каждом опыте повторялись 10 раз, измерения влажности – 3 раза. Кроме того, для определения *дисперсии воспроизводимости* изучаемых параметров проведено 7 опытов при средних значениях независимых переменных и найдены среднеквадратичные ошибки воспроизводимости: (соответственно для газопроницаемости, прочности и влажности): s_Γ=4,1 ед., $s_{\sigma p}$=5,3 кПа, s_W = 0,218%.

Значения независимых переменных в опытах и полученные результаты приведены в таблице 8.2.

6. Построены билинейные модели для каждого из исследуемых свойств смеси. Для нахождения параметров (коэффициентов) в уравнениях модели использовался множественный регрессионный анализ.

7. Проведены проверки адекватности уравнений модели и значимости их коэффициентов, отсеяны незначимые коэффициенты.

Таблица 8.2

Состав и режимы				Свойства		
$x_1=c_\Pi$	$x_2=\tau$	$x_3=c_1$	$x_4=\delta$	σ	Γ	W
%	с	%	кг/м^3	кПа	ед.	%
5	100	6	1250	93,4	86,7	5,7
0	100	6	1250	92,7	86,0	5,7
5	20	6	1250	75,5	80,3	5,5
0	20	6	1250	77,4	75,4	6,0
5	100	2	1250	71,9	87,4	5,5
0	100	2	1250	92,0	96,8	4,6
5	20	2	1250	79,6	57,5	5,7
0	20	2	1250	80,4	51,3	5,3
5	100	6	1050	71,8	105,1	6,2
0	100	6	1050	84,1	93,8	4,5
5	20	6	1050	72,5	72,4	6,0
0	20	6	1050	86,9	93,0	5,9
5	100	2	1050	74,2	98,7	6,0

0	100	2	1050	92,7	78,4	3,8
5	20	2	1050	63,2	70,5	3,1
0	20	2	1050	78,1	63,9	6,7

После удаления незначимых коэффициентов аппроксимирующие функции получили вид:

$$\Gamma = 80{,}67 + 0{,}4747\ \tau + 5{,}925 c_\Gamma - 0{,}034\ \delta - 0{,}0528\ \tau c_\Gamma \text{ ед.},$$

$$\sigma = 76{,}21 - 12{,}98\ c_\Pi + 0{,}0925\ \tau + 0{,}694\ c_\Gamma + 8{,}7 \cdot 10^{-4}\ \delta + 9{,}5 \cdot 10^{-3}\ c_\Pi \delta \text{, кПа},$$

$$W = 4{,}41 - 0{,}285\ c_\Pi - 0{,}0166\ \tau + 0{,}15\ c_\Gamma + 1{,}13010^{-3}\ \delta + 5{,}25 \cdot 10^{-3}\ c_\Pi\ \tau \text{ , \%},$$

где c_Π, c_Γ – в %; τ – в *с*; δ – в *кг/м*^{3}.

Эти уравнения представляют собой модель формовочной смеси для конкретных производственных условий.

Упомянутый многомерный регрессионный анализ может быть выполнен, например, посредством программы *Excel* (корпорация Microsoft).

Задачи оптимизации. Постановка задач математического программирования

В оптимизационных задачах находится экстремум некоторой количественной характеристики объекта или процесса. Одним из наиболее распространенных типов оптимизационных задач являются задачи *математического программирования*. В этих задачах задаётся область допустимых значений переменных процесса или объекта, и в этой области отыскивается некоторое оптимальное значение заданной функции от этих переменных (называемой *целевой функцией*). Область допустимых значений задаётся *системой неравенств*, показывающих, какие значения переменных (или функций от них) допускаются, а какие – нет.

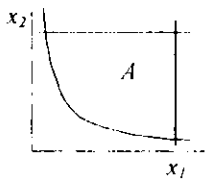


Рис. 8.51

На рис. 8.51 неравенствами $x_1 \le const1$, $x_2 \le const2$, $x_1 \cdot x_2 > const3$ выделена область A допустимых значений переменных x_1, x_2. Например, при расчёте состава шихты минимальной стоимости переменными являются количества различных компонентов шихты. Область допустимых значений переменных определяется требованиями к химическому составу сплава, зависящему от состава шихты, различными производственными условиями и рекомендациями по составу шихты, получаемыми на основе предшествующего опыта производства подобных сплавов, а целевая функция – стоимость шихты, которая зависит от используемых компонентов, то есть переменных задачи. В процессе приготовления смеси целью управления обычно является получение смеси с

заданными свойствами. Переменными являются компоненты смеси и режимы её приготовления. Область их допустимых значений определяется возможностями изменения состава и режимов смешивания. Целевая функция управления в этой задаче – достижение предельных значений каких-либо свойств смеси или их комбинаций, наиболее существенных для данного производства.

В примере на рис. 8.51 всего две независимых переменных, поэтому область допустимых значений представляется плоской поверхностью, окружённой кривыми, заданными уравнениями $x_1=const1$, $x_2=const2$, $x_1x_2=const3$. Если независимых переменных три, область допустимых значений будет представлять грёхмерное тело, ограниченное поверхностями (в случае линейных ограничений – плоскостями). Если же переменных больше трёх, то область допустимых значений будет представляться частью *многомерного пространства* (*гиперпространства*), окружённого *гиперповерхностями* или *гиперплоскостями*.

Обычно применяют следующие способы выбора критерия оптимальности.

• *Частный критерий оптимальности* – когда выбирается один из выходных параметров и отыскивается его экстремальное значение. Примером является определение переменных процесса приготовления смеси, обеспечивающих максимальную газопроницаемость.

• *Аддитивный критерий* – целевая функция представляет собой взвешенную сумму частных критериев:

$$F(X) = \sum_{j=1}^{m} \omega_j y_j(X),$$

где y_j – j-й выходной параметр, являющийся функцией от вектора X независимых переменных x_i; ω_j – весовой коэффициент; m – число выходных параметров. Примером служит целевая функция расчёта шихты, в которой весовые коэффициенты представляют собой стоимости единиц массы каждого компонента шихты.

• *Мультипликативный критерий* имеет вид:

$$F(X) = \prod_{j=1}^{m} y_j^{\omega_j}(X).$$

• *Максиминный критерий* обеспечивает максимальный запас работоспособности, например, максимальную вероятность попадания некоторого выходного параметра, имеющего вероятностный характер, с наименьшей, по сравнению с другими, областью допустимых значений, в эту область. Для этого определяется запас работоспособности

такого параметра S_j и этот запас рассматривается как j-й выходной параметр. Например,

$$S_j=(T_j - y_{ном\,j})/\delta_j,$$

где $y_{ном\,j}$ *и* Tj– номинальное значение и ограничение по j-му параметру (при $T_j > y_{ном\,j}$), а δ_j – некоторая характеристика его рассеяния. Тогда целевая функция задачи принимает вид:

$$F(X) = max(\,min\, S_j(X)),$$

которая отыскивает максимальное значение для наименьшего S_j.

Задачу математического программирования можно формулировать и как *задачу центрирования*. В ней требуется совместить область допустимых значений и область возможных колебаний параметров таким образом, чтобы вероятность выхода за пределы допустимой области была минимальной.

В зависимости от вида целевой функции и ограничивающих неравенств различают задачи линейного, нелинейного и стохастического программирования, если целевая функция и ограничения соответственно линейны, нелинейны относительно переменных задачи или имеют вероятностный характер.

Пример задачи линейного программирования – нахождение оптимального состава шихты.

Методы решения линейных и нелинейных задач существенно различны. При решении линейной задачи решающая программа находит (методом перебора разных вариантов) одну из вершин многомерного многогранника, заданного ограничивающими плоскостями (гиперплоскостями), и затем движется по одному из рёбер этого многогранника в направлении возрастания (убывания) целевой функции. Поиск решения заканчивается в той вершине, из которой движение по любому входящему в него ребру не приводит к желательному изменению целевой функции. Результат решения линейной задачи всегда однозначен.

В нелинейных задачах решающая программа начинает работу с любой начальной, заданной пользователем точки (в многомерном пространстве независимых переменных). Программа определяет (в ближайшем окружении этой точки) направление, в котором значение целевой функции возрастает (если ищется максимум), и движется в этом направлении, перемещаясь от точки к точке. Когда программа в ближайшем окружении больше не находит таких направлений, она считает последнюю найденную точку максимумом.

В нелинейных задачах целевые функции могут иметь несколько экстремумов. Различают экстремумы глобальные (во всей области до-

пустимых значений) и локальные. Большинство решающих программ (например, программа «Поиск решения» в Excel) отыскивают только локальные экстремумы, и результаты поиска будут зависеть от того, в зоне какого экстремума находилась начальная точка поиска. Например (рис. 8.52), целевая функция одной переменной $(y=-0{,}25x^4+3{,}3x^3-15{,}5x^2+30x-15{,}67)$ имеет максимумы в точках $x = 2$ и $x = 5$ и минимум в точке $x = 3$. Результатом поиска может быть или $y = 5$ (при $x = 2$), если начальной точкой поиска было $x < 3$, или $y = 7{,}25$ (при $x = 5$), если начальной точкой поиска было $x > 3$. Поэтому, если целевая функция имеет локальные экстремумы в нескольких зонах области допустимых значений, их поиск следует проводить в каждой из этих зон.

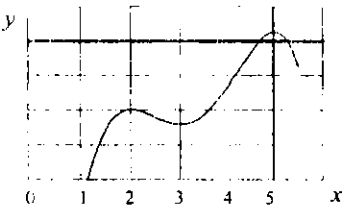


Рис. 8.52

Модель формовочной смеси, найденная выше, представляет собой три уравнения регресии, и определять оптимальные состав и режим приготовления смеси следует с учётом этого обстоятельства.

Учёт статистического характера зависимостей. Задача центрирования

В этой задаче требуется поместить точку оптимального режима в области допустимых значений таким образом, чтобы область возможных колебаний значений выходных параметров максимально совместилась с областью их допустимых значений.

Для этого зададим предельно допустимые значения заданных свойств смеси T_Γ, T_δ, T_W для модели из примера

$$\Gamma \geq T_\Gamma$$
$$\delta \geq T_\delta$$
$$W \leq T_W$$

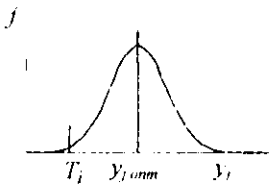


Рис. 8.53

В левой части этих неравенств стоят значения Γ, δ, W, определяемые приведёнными выше уравнениями регресии, в правой – их допустимые значения.

На рис. 8.53 показана плотность распределения некоторого j-го параметра (при

$T_j < y_{j\,опт}$, где $y_{j\,опт}$ – среднее значение выходного параметра y_j в точке оптимума, то есть в нашем случае для Γ и δ). Площадь под кривой распределения левее точки T_j представляет вероятность того, что полученные значения параметра y_j будут ниже требуемых, а правее - вероятность того, что параметр y_j будет выше минимально требуемого значения.

Для того чтобы сравнивать вероятности получения годной (или негодной) смеси по разным параметрам, пронормируем их по их стандартным отклонениям:

$$(y_{j\,опт} - T_j)/\sigma_j \geq S_j \ (при\ y_{j\,опт} > T_j);$$
$$(T_j - y_{j\,опт})/\sigma_j \geq S_j \ (при\ y_{j\,опт} < T_j),$$

где $y_{j\,опт}$ – среднее значение выходного параметра y_j в точке оптимума; T_j – заданное допустимое значение параметра y_j, σ_j - стандартное отклонение этого параметра; S_j – нормированный запас работоспособности по этому параметру. Отношение $y_{j\,опт} > T_j$ имеет место, например, для функций Γ и δ. Для функции W, очевидно, $y_{j\,опт} < T_j$. Величины S_j измеряют разности между $y_{j\,опт}$ и T_j в единицах стандартных отклонений. Желательно получить $S_j \sim 3$ (если распределение y_j примерно подчиняется нормальному закону), так как это обеспечит попадание практически всех значений y_j в область допустимых значений. Если одновременно для всех параметров y_j это сделать не удаётся, обычно стремятся выбрать оптимальный режим таким образом, чтобы получить максимальный запас работоспособности S_j по тому параметру, по которому он оказывается наименьшим (в такой постановке задачи критерий оптимальности называется *максиминным критерием*).

Для решения такой задачи следует определить значения S_j для всех параметров $(j=1...m)$ по приведённым выше формулам, в которые вместо $y_{j\,опт}$ следует подставить вычисляемые программой значения выходных функций (Γ, δ, W), и выбрать из них наименьший, то есть найти $min(S_\Gamma, S_\delta, S_W)$. Такой выбор можно сделать, например, при помощи функции МИН (*список аргументов*), имеющейся в EXCEL в категории статистических функций. Затем следует с помощью программы решения задачи математического программирования искать максимальное значение функции $min(S_\Gamma, S_\delta, S_W)$, то есть значение $max(min(S_\Gamma, S_\delta, S_W))$.

В этом расчёте следует также учесть расчёт освежения, а главное – вывод части смеси в отвал для соблюдения баланса мелких частиц, чтобы предотвратить их накапливание в смеси.

Общая схема решения задачи выглядит следующим образом.

В программу должно быть введено:

- Начальные значения независимых переменных.
- Уравнения свойств смеси как функций независимых переменных.
- Ограничения на диапазон изменения независимых переменных.
- Предельные значения T_j.
- Стандартные ошибки воспроизводимости δ_j или их оценки s_j.
- Формулы для расчёта запасов работоспособности S_j.

Программа выполняет следующие действия:

- подставляет заданные исходные значения независимых переменных $c_{П_i}$, $c_{Г_i}$, τ, δ, в уравнения модели Γ, δ, W и вычисляет их.
- Подставляет найденные значения Γ, δ, W (как $y_{j\ опт}$) в уравнения для S_j и вычисляет последние. При этом в качестве стандартных отклонений используются оценки среднеквадратичных ошибок воспроизводимости s_Γ, $s_{\delta_{пр}}$, s_W, найденные при построении модели смеси.
- Находит минимальное значение из S_j при помощи функции $min(S_\Gamma, S_\delta, S_W)$.
- Изменяет исходные значения $c_{П_i}$, $c_{Г_i}$, τ, δ поочерёдно на небольшую величину и, повторив весь цикл расчётов, находит новые значения $(min(S_\Gamma, S_\delta, S_W))$, выбирая такое направление движения по координатам $c_{П_i}$, $c_{Г_i}$, τ, δ, в котором значение $(min(S_\Gamma, S_\delta, S_W))$ возрастает.
- Это движение продолжается до тех пор, пока во всех направлениях от текущей точки расчёта значение $min(S_\Gamma, S_\delta, S_W)$ не возрастает. Эта точка является точкой локального максимума.

Использование функции *min* преобразует задачу в нелинейную. Функция *min S* нелинейна (точнее, кусочно линейна) даже при линейных зависимостях $y_i = f(x_j)$ и может иметь несколько экстремумов. Это видно из рис. 8.54, где показаны три линейных функции от x в диапазоне допустимых значений x от a до b.

Результат поиска $min(f_i)$, $i = 1...3$ будет различным в зависимости от начальной точки поиска. Если она будет левее точки c, $min(f_i)$ будет найден в точке a, в противном случае – в точке b.

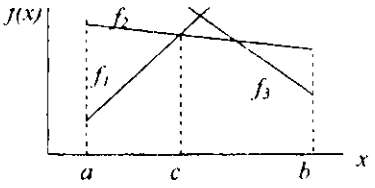


Рис. 8.54

Ввиду нелинейности функций для поиска глобального экстремума должны проверяться разные наборы начальных значений независимых переменных.

Рассчитанные значения компонентов смеси используются для установки заданий дозаторам компонентов смеси.

Управление процессом

Схема установки приготовления смеси с автоматическим регулированием состава смеси по её свойствам приведена на рис. 8.55.

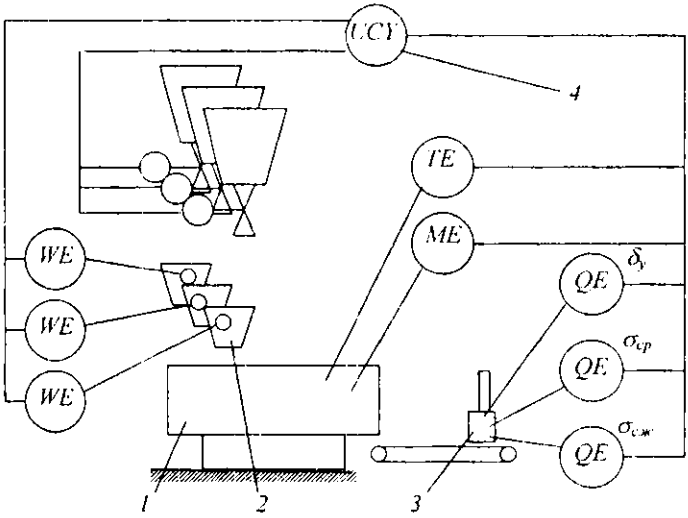


Рис. 8.55

Автоматические приборы для контроля свойств формовочной смеси определяют или уплотняемость, прочность на сжатие и прочность на срез, или же уплотняемость и твёрдость смеси в образце.

Компоненты смеси загружаются в смеситель *1* из весовых бункерных дозаторов *2*. В чаше смесителя установлен зонд для измерения влажности (*ME*) и температуры (*TE*). Прибор *3* для контроля свойств формовочной смеси (уплотняемости δ_y, прочности на срез $\sigma_{ср}$ и прочности на сжатие $\sigma_{сж}$) установлен над транспортёром готовой смеси. Через заданные промежутки времени прибор берёт из потока готовой

смеси пробы и проводит их испытания. Результаты измерений поступают в программируемый контроллер *4* для накопления, обработки и выработки управляющих воздействий.

Измеренные значения уплотняемости используются для оперативного регулирования количества вводимой в смесь воды. При этом учитывается также температура смеси. Результаты испытаний прочности образцов на сжатие и срез служат для определения содержания активного бентонита и используются для его регулирования.

Регулирование подачи бентонита проводится с меньшей частотой, только после накопления некоторого объёма статистических данных и выявления устойчивой тенденции к изменению его содержания. Количество углеродосодержащих добавок регулируется пропорционально бентониту.

Результаты испытаний прочности могут храниться в памяти контроллера в виде очереди, содержащей некоторое количество результатов, полученных в последнее время. Эти результаты могут быть представлены в виде графика, на котором, кроме опытных данных, нанесены предельные (максимальное и минимальное) значения контролируемых величин. Пример такого графика показан на рис. 2.4.

Интервал времени, на котором следует принимать решение о корректировке бентонита и углеродосодержащих добавок, зависит от степени однородности оборотной смеси. При сравнительно однородной смеси этот интервал может быть небольшим, и свойства смеси будут регулироваться достаточно точно. Если же наблюдаются частые и резкие колебания, требуется больше времени, чтобы определить действительную тенденцию изменения прочности. Поэтому надо знать действительные статистические характеристики свойств смеси.

§ 13. Автоматическая сортировка и ориентация. Системы технического зрения

Задачи автоматической сортировки и ориентации

Автоматическая сортировка и ориентация отливок и других объектов технологического назначения являются трудно решаемыми задачами. Поэтому во всех случаях, когда это возможно, стремятся сохранить ориентацию отливки, если это экономически целесообразно. Обычно такие задачи возникают при разборке и сортировке мелких отливок после выбивки, дробемётной обработки отливок в барабанах, при их установке в обдирочные станки, обрезные и правильные штампы, в установки для контроля качества изделия.

Задачи автоматической сортировки и ориентации решаются двумя путями:

- Использование механических устройств, использующих особенности конфигурации или каких-либо физических свойств объектов производства. Такие приёмы эффективны для небольших объектов сравнительно простой конфигурации при массовом характере производства.
- Использование систем технического зрения в составе робототехнических комплексов.

Сортировка и контроль качества

Одной из задач сортировки отливок является определение бракованных отливок.

На ранних стадиях автоматизации литья под давлением для обнаружения брака и контроля качества полученных отливок, важнейшим показателем которых является отсутствие в них раковин, применялось взвешивание. Низкий вес отливки свидетельствовал о наличии в них раковин.

С развитием этого способа литья, совершенствованием оборудования и систем управления, обеспечивающих высокую стабильность технологического процесса, и повышением требований к отливкам такой метод контроля стал недостаточно эффективным.

В настоящее время автоматический контроль качества при литье под давлением иногда выполняется посредством контроля максимального давления в полости формы при запрессовке. Это давление определяется пьезоэлектрическим датчиком, встроенным в форму, на который передаётся усилие от одного из толкателей формы.

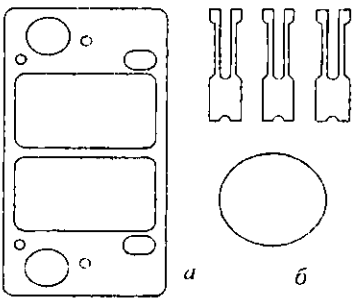


Рис. 8.56

Для визуального контроля деталей возможно применение *систем технического зрения* (СТЗ). На рис. 8.56 показаны образцы деталей, контролируемых одной из первых промышленных СТЗ. На рис. 8.56,а представлена большая автомобильная деталь (штамповка) с большим количеством отверстий, которая сходит с пресса каждые три секунды, на рис. 8.56,б – мелкие отливки с размером до 7 мм, получаемые методом литья под давлением, которые перемещаются перед камерой СТЗ в произвольных положениях со скоростью 360 штук в минуту. Для контроля

этих деталей определялись такие характеристики детали, как её площадь и периметр, количество отверстий.

Ориентация отливок

Простейшей среди задач ориентации является контроль наличия отливки на позиции её обработки.

При автоматическом производстве мелких отливок методом литья под давлением, когда используются многогнёздные формы, необходимо контролировать полноту выхода всего куста отливок из формы, то есть иметь уверенность в том, что все полученные отливки удалены из своих гнёзд. В противном случае при последующем закрывании формы последняя может быть повреждена застрявшей в форме отливкой. Поэтому часто извлечённый из формы куст (блок) отливок помещается напротив контрольной рамки, в которой установлены датчики, проверяющие наличие отливок. Обычно применяются пневматические датчики, которые представляют собой сопло, через которое на контролируемый объект направляется струя воздуха. Если в непосредственной близости от сопла датчика имеется какой-нибудь объект (например, контролируемая отливка), давление в сопле повышается, что и является сигналом о наличии проверяемого объекта.

Контроль ориентации отливки необходим для обработки отливок шлифовальными кругами на зачистном оборудовании.

Для загрузки технологического оборудования небольшими отливками простой конфигурации применяются полуавтоматические магазинные или автоматические бункерные устройства, например вибробункеры. Бункеры могут снабжаться ориентирующими устройствами. Принципы действия ориентирующих устройств основаны на различных особенностях отливок (асимметрии, смещении центра тяжести и т.д.). Для примера на рис. 8.57 показана укладка отливки втулки клапана в барабан зачистного автомата. Отливка цилиндрической формы имеет конусообразную часть.

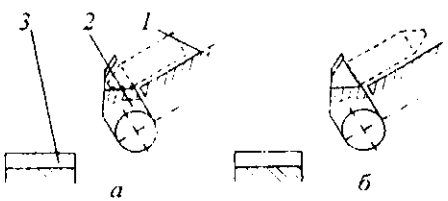


Рис. 8.57

Она подаётся из бункера на жёлоб *1*. При этом впереди у неё может оказаться или плоский, или конический торец. Если впереди торец плоский, то он не входит в коническое отверстие поворотного рычага *2* (рис. 8.57,б) и при повороте последнего просто соскальзывает по его наружной поверх-

ности в гнездо загрузочного барабана обдирочного станка *3*. Если же впереди оказался конический торец (рис. 8.57,а), то он входит в отверстие рычага и при его повороте поворачивается вместе с ним. В конце поворота отливка выталкивается через отверстие рычага жёстким упором и оказывается в гнезде барабана *3* в том же положении – с плоским торцем слева.

Подобные приспособления применимы только для отливок очень простой конфигурации при больших объемах производства. В других случаях альтернативой ручной укладке может быть только робототехнический комплекс с системой технического зрения.

Системы технического зрения

Основным назначением систем технического зрения является обнаружение объектов, их распознавание, идентификация и определение положения, с тем, чтобы дать системе управления связанного с ней робота информацию, необходимую для захвата этого объекта роботом.

Система технического зрения состоит из первичного преобразователя зрительного изображения в электрический сигнал, устройства предварительной обработки зрительной информации и ЭВМ, которая реализует конкретные алгоритмы распознавания зрительных образов и определения требуемых количественных параметров последних.

В качестве первичных преобразователей применяют электронно-лучевые преобразователи (телевизионные передающие трубки) и полупроводниковые приборы (особенно с зарядовой связью). Наряду с видимым диапазоном электромагнитного излучения могут использоваться и другие участки спектра: инфракрасный (ИК) диапазон (тепловидение), ультракороткий, радиодиапазон, рентгеновский диапазон.

Применяют также ультразвуковые преобразователи. В особых случаях используют преобразователи, способные работать в непрозрачных средах, вплоть до твёрдых тел (интроскопия). В этих условиях используются различные проникающие излучения, в частности рентгеновское и ультразвуковое.

Промышленные системы технического зрения имеют следующие ограничения:

- каждая деталь может находиться в одном или нескольких стабильных состояниях (деталь, подвешенная на крюке и имеющая возможность раскачиваться или поворачиваться, имеет бесконечное число состояний и не удовлетворяет этому ограничению);
- на основе выявления контраста между деталью и фоном, достигнутого с помощью соответствующего освещения, может быть получен двумерный образ, соответствующий силуэту детали;

• все детали, находящиеся в поле зрения, изолированы друг от друга, то есть не соприкасаются и не перекрывают друг друга.

Применительно к задачам определения ориентации в области литейного производства эти задачи удовлетворительно решаются для плоских отливок или отливок, которые могут занимать (на столе прибора или ленте конвейера) только несколько определённых положений.

Распознавание таких деталей состоит из нескольких этапов:

- Получение контрастного плоского изображения детали.
- Получение математического описания контура (границ) детали.
- Сопоставление найденного контура с заданными эталонами контуров для идентификации деталей.
- Определение по найденному контуру положения детали в пространстве (для передачи координат детали системе управления робота).

Для решения первой задачи – получения контрастного изображения – существует несколько способов. Используется линейка фотодетекторов (или линейно сканирующая камера) в сочетании с движущейся лентой конвейера, на котором лежат детали. Применяются также передающие телевизионные камеры. В этом случае часто используются твёрдотельные камеры – приборы с зарядовой связью, в которых в отдельных ячейках накапливается электрический заряд, пропорциональный освещённости этой ячейки.

Разрешающая способность системы технического зрения определяется числом отдельных точек (или элементов изображения), которые должны быть различимы на изображении. В первых промышленных СТЗ это число обычно не превышало 512 × 512 элементов и было достаточным для распознавания плоских изображений.

Для получения контрастного изображения применяется специальное освещение детали (см. ниже). В ряде случаев используется поверхность (например, лента конвейера) из прозрачного материала.

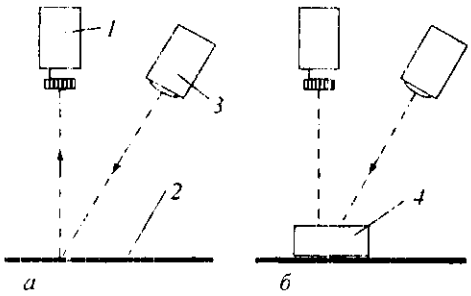


Рис. 8.58

Линейка фотодетекторов (или линейно сканирующая камера) *1* размещена над ленточным конвейером *2* (рис. 8.58,а). Эти фотодетекторы сфокусированы на узкой полосе поверхности конвейера, перпендикулярной направлению его движения. Источник света *3* испускает тонкую полоску света. Этот свет отражается от поверхности конвейера и попадает в камеру *1*. При этом камера «видит» яркую полосу света. Если же на конвейере появляется крупный объект (рис. 8.58,б), освещённая полоса (теперь она находится на поверхности детали) уже не попадает в поле зрения камеры *1*, и последняя её не видит. При перемещении конвейера СТЗ периодически считывает величины освещённости с линейки фотодетекторов, и в её памяти формируется плоское изображение объекта.

Это изображение (рис. 8.59,а) представляет собой двумерный массив, отображающий поле зрения сканирующей камеры («сцену»), в котором выделены ячейки, соответствующие объекту.

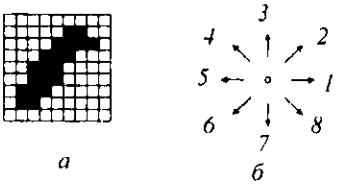


Рис. 8.59

Для устранения мешающего влияния теней, которые могут возникнуть из-за сложной конфигурации поверхности контролируемого объекта, могут использоваться два источника света с разными углами наклона. Когда пучок света от одного источника прерывается (или, наоборот, не прерывается из-за бликов в результате освещения поверхности ленты светом, отражённым от поверхностей объекта), с лучом от другого источника этого не происходит.

Следующим этапом работы СТЗ является нахождение по полученному чёрно-белому двумерному изображению объекта математического описания контуров границы объекта.

Для этого ячейки сцены проверяются одна за другой, начиная, например, с верхнего ряда слева направо. Первая найденная при этом чёрная (на схеме) ячейка относится к контуру объекта. После этого начинает работать алгоритм нахождения точек (ячеек), принадлежащих контуру. Проверяются все ячейки, соседние с очередной ячейкой контура. Если все смежные с ней точки (ячейки) имеют один цвет (чёрный или белый), то эта ячейка не принадлежит к контуру. Если же часть этих точек чёрная, а часть – белая, то эта точка лежит на контуре (границе) объекта.

Для фиксации точек контура используется так называемая цепная запись. В очередной элемент массива записывается направление

(числами от 1 до 8; см. рис. 8.59,б), в котором была найдена соответствующая граничная точка по отношению к предыдущей. Таким образом, запись массива граничных точек для фигуры, показанной на рис. 8.59,а, получает вид:

1, 8, 5, 6, 6, 7, 6, 6, 5, 3, 2, 3, 2, 2, 2, 2.

В работе по нахождению контура детали существует несколько промежуточных этапов. Например, иногда необходимо превратить полутоновое изображение в чёрно-белое. Для этого задаётся некоторый порог освещённости ячейки. Если освещённость какого-то элемента изображения выше заданного порога, то оно считается белым, и наоборот. Выполняется также поиск отверстий в детали. Существуют методы расшифровки изображений, позволяющие различать соприкасающиеся детали и даже детали, частично перекрывающие друг друга.

Для контура любой конфигурации можно получить несколько основных параметров, однозначно характеризующих этот контур. К ним относятся площадь, длина периметра, размеры минимального охватывающего прямоугольника, моменты инерции и т.д., которые позволяют классифицировать объект.

Первая промышленная установка СТЗ в литейном цехе была применена для обслуживания роботов, выполняющих съём отливок с ленточного транспортёра и погрузку их в транспортировочные контейнеры, в каждый контейнер отливки только одного наименования. На линии обрабатываются отливки шести наименований автомобильной номенклатуры (различные крышки и картеры автомобиля и двигателя). На участке производится обдирка и шлифовка отливок. Обработанные отливки помещаются на ленточный транспортёр. На этом транспортёре рабочие – контролёры - осматривают отливки и отделяют брак, поворачивая дефектные отливки в определённое положение. Задача СТЗ – найти годные отливки, определить их тип и положение на конвейере и сообщить эти данные одному из роботов, обслуживающих линию. Устройство СТЗ расположено по ходу транспортёра вслед за участком осмотра. Дальше по ходу транспортёра размещены три робота. Каждый робот оснащён схватом, приспособленным для манипулирования отливками всех возможных шести типов. Рядом с каждым роботом стоят два контейнера, в которые он помещает отливки. В конце транспортёра расположена позиция для ручного снятия отливок с ленты и бункер для бракованных деталей.

СТЗ после получения информации об отливке строит её образ и по нему вычисляет площадь отливки, её минимальный и максималь-

ный диаметры, количество отверстий, моменты второго порядка и другие характеристики. Затем полученные значения сравниваются с эталонами, записанными в каталоге деталей, полученным в процессе обучения системы. При обучении задаются диапазоны допустимых отклонений от каждого из эталонных значений.

Если зафиксировано совпадение характеристик распознаваемого объекта с эталоном, то СТЗ определяет угол разворота отливки относительно направления движения транспортёра и определяет координаты положения на детали точки захвата её роботом. Эта информация сообщается одному из роботов, обслуживающих линию.

§14. Контроль процессов и стандарты ISO 9000

Управление качеством тесно связано с его контролем. Традиционно контроль качества основывался на измерении показателей качества продукции на специальных технологических операциях контроля и выбраковке негодных изделий.

Автоматический контроль качества отливок, вызванный в первую очередь необходимостью определять бракованные отливки, оказался весьма трудной задачей, решить которую с экономически оправданными затратами часто оказывается невозможно. Это объясняется и повышением уровня требований к качеству, и вызванное этим использование для целей контроля сложных и трудоёмких методов исследования качества. Такая ситуация сложилась не только в сфере литейного производства. Она характерна и для всего современного промышленного производства в целом. Поэтому в настоящее время сформировался новый подход к проблеме обеспечения качества промышленной продукции.

Международная организация по стандартизации (ISO) выпустила серию стандартов по системе менеджмента качества (ISO 9000). В этих стандартах реализуется другой подход, основанный на контроле качественных показателей не самих изделий, а проектных процедур и технологических процессов, используемых при создании этих изделий.

Стандарты менеджмента качества серии ISO 9000 исходят из того, что невозможно провести 100-й контроль всей продукции. Происходит переориентация стандартов с качества продукции на качество процессов, поскольку тот или иной уровень качества продукции определяется точностью соблюдения параметров технологических процессов, используемых для получения этой продукции.

Разумеется, новый подход не означает отказа от использования в литейном производстве принятых и экономически оправданных методов контроля качества, по крайней мере, в настоящее время. Напри-

мер, сбор бракованных отливок на «площадках брака» и периодический их анализ специалистами или применяемый в литье под давлением контроль последней отливки, полученной в форме (литейщик в конце работы оставляет на рабочем месте последнюю полученную в ней отливку, и она изучается литейщиком следующей смены или слесарем при ремонте этой формы), эффективно используются для повышения качества.

Стандарты ISO 9000 основными элементами эффективной системы менеджмента качества считают информационное обеспечение на всех уровнях предприятия, сбор и использование данных и информации о процессах на постоянной основе (ГОСТ Р ИСО 9004–2000), проведение анализа данных, способствующего постоянному улучшению процессов. Простейшим примером получения информации для системы менеджмента качества, выполняемой средствами автоматизации процесса, является следующий. В форме литья под давлением устанавливается датчик, фиксирующий максимальное давление в жидком металле в полости формы. Существует тесная связь этого давления с плотностью, а следовательно, и с качеством получаемой отливки. Если датчик фиксирует давление ниже установленного, возможен выбор одного из вариантов:

- направить отливку в брак;
- направить её для дополнительного контроля.

Кроме того, предусматривается оповещение информационной системы менеджмента качества предприятия о появлении отклонений в литейном процессе для анализа причин и принятия соответствующих мер.

В производстве отливок литьём в сырые песчано-глинистые формы получить информацию о всех стадиях процесса затруднительно. Эту проблему решает система *PDC* – система сбора данных об отливке.

Кроме того, на современных АФЛ необходимая информация передается с одного агрегата линии на другой. Например, обслуживающий персонал может маркировать бракованную форму (повреждённую или со сломанным стержнем), и эта форма не будет залита металлом. Можно найти формы (уже на участке охлаждения), залитые из ковша некачественным металлом, и полученные в этих формах отливки будут выведены из потока.

Одно из возможных решений этой задачи (при наличии локальной информационной сети) заключается в следующем.

Специальная программа представляет собой информационную модель линии (рис. 8.60,а – моделируемый объект, рис. 8.60,б – информационная модель объекта).

В этой модели каждая позиция линии представлена элементом массива структур[1] с определённым адресом. Содержанием каждого элемента массива является информация о форме, которая в данный момент находится на позиции, соответствующей данному элементу. При перемещении форм с позиции на позицию в информационной модели перемещается и содержание элементов массива из одной ячейки массива в другую.

Таким образом, метка о повреждении формы, поставленная на участке формовки, достигает (в информационной модели) элемента массива, соответствующего позиции заливки, тогда, когда на позицию заливки попадёт реальная повреждённая форма.

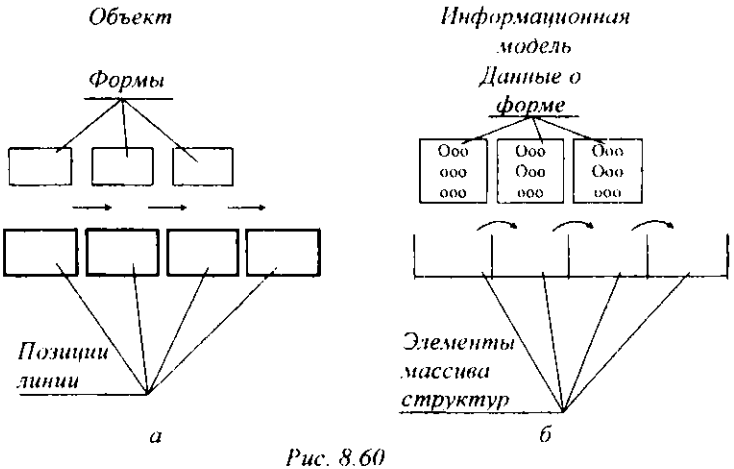


Рис. 8.60

Эта метка будет считана программой управления заливкой, и форма не будет залита.

На позиции заливки в соответствующую ячейку массива вводится номер ковша, из которого заливается форма. Позже, когда будет проведён анализ металла в этом ковше, можно найти форму (если она ещё не прошла выбивку), залитую этим металлом, и удалить её из основного потока форм. Заметим, что до заливки выполнить анализ мо-

[1] Структура – составной тип данных, состоящий из набора данных разного типа (термин вычислительной техники).

дифицированного чугуна невозможно, так как металл необходимо заливать сразу же после модифицирования.

Если же требуется собрать всю информацию о производстве какой-либо отливки, то дополнительно используется база сбора данных об отливке. В неё вводится в качестве ключа номер формы, в которой она получается. Этот же номер указывается в соответствующей ячейке массива информационной модели.

Тогда при формовке этой опоки в базе данных указывается номер замеса формовочной смеси и данные о формовке, снимаемые с датчиков формовочной машины: масса смеси в форме, номер подмодельной плиты, режим уплотнения. При установке стержней в эту форму указывается номер стержневого ящика и номер замеса стержневой смеси. При заливке указывается номер ковша и информация, снимаемая с датчиков заливочной установки: количество модификаторов, введённых в форму, масса заливаемого металла, температура и продолжительность заливки.

Собранная в базе данных информация выглядит следующим образом (табл. 8.3):

Таблица 8.3

Номер формы	Формовка				Стержни		Заливка				
	Номер замеса	Масса смеси в форме	Режим уплотнения	Номер подмодельной плиты	Номер замеса	Номер ящика	Номер ковша	Температура заливки	Время заливки	Масса залитого металла	Масса модификатора в форме

В базах данных металлургической лаборатории и лаборатории формовочных материалов хранятся результаты анализов каждого ковша и каждого замеса формовочной и стержневой смеси. Анализ металлургической лаборатории содержит результаты лабораторных испытаний образцов, количество и марку модификатора, введённого в ковш. Анализы смесей содержат данные о составах и свойствах смесей.

Для получения окончательной информации об отливке выполняется запрос по соответствующим таблицам баз данных лабораторий, причём таблицы связываются по номерам замесов и ковшей.

В результате получается полная информация об условиях получения каждой пронумерованной отливки.

Контрольные вопросы и практические задания

1. Укажите особенности непрерывного, позиционного и импульсного регулирования.
2. Какие параметры стабилизируются в литейных процессах?
3. Составьте алгоритм включения смесителя большой производительности.
4. Какой компонент выбирается в качестве ведущего при соответствующим методе дозирования?
5. Приведите примеры использования метода распознавания образов.
6. Перечислите данные, которые необходимы для оптимизации состава формовочной смеси.
7. Напишите уравнения, необходимые для оптимизации состава формовочной смеси.
8. Составьте алгоритм для компенсационного метода дозирования на основе описания в разделе «Дозирование».
9. Преобразуйте функциональную схему и алгоритм измерения расхода в схему и алгоритм для управления дозированием без промежуточной ёмкости по указаниям в разделе «Дозирование».
10. Составьте алгоритм для контроля исправности механизмов машины по времени их срабатывания (контроль циклограммы), пользуясь указаниями в разделе «Распознавание образов».

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Инженеры смогли приступить к широкому использованию расчётных методов при разработке проблем литейной технологии и созданию математических моделей литейных процессов только после того, как они решили сложнейшие задачи, связанные с полётами в космос и освоением ядерной энергии. Так, разработчики немецкой программы моделирования процесса литья ссылаются на алгоритмы, опубликованные сотрудниками Лос-Аламосской лаборатории, где создавалось американское ядерное оружие. Русские математики, известные своими трудами по проблемам движения тел в космическом пространстве, участвовали в разработке наиболее сложных решающих модулей для моделирования формирования отливки в отечественной программе «Полигон». Это свидетельствует о сложности проблем литейной технологии. Такие проблемы сегодня эффективно решаются только при широком привлечении и использовании возможностей вычислительной техники.

Сегодня среди задач, имеющихся в области управления литейными процессами, решение которых может обеспечить значительное продвижение в направлении их совершенствования, можно назвать следующие.

Разработка средств измерения с целью контроля таких параметров литейных процессов, для которых сегодня не существует оперативных методов измерения, и которые могли бы быть использованы в режиме реального времени для автоматического управления. Обычно в таких случаях используются различные физические свойства измеряемой среды, и измерения основываются на косвенных показателях. Средства вычислительной техники позволяют достаточно легко измерять эти физические эффекты и учитывать влияние возмущающих воздействий. Создание новых средств измерений позволит более оперативно, более детально контролировать длительный, многооперационный и разнооперационный литейный процесс, сократить время запаздывания информации о процессе, повысить эффективность управления им.

Изучение статистических характеристик материалов и процессов и анализ факторов, влияющих на их дисперсию, позволят в условиях автоматизированного производства сжать диапазон разброса этих характеристик и сместить его в сторону максимально достижимых значений. Это повысит предельно допустимые величины служебных свойств литых деталей, увеличит производительность литейных процессов, улучшит их конкурентоспособность.

Широкое использование в управлении литейными процессами математических (теоретических или статистических) моделей позволит оптимизировать процессы, повысить их производительность и качество получаемой продукции.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Беленький А.М. Автоматическое управление металлургическими процессами. – М.: Металлургия, 1989.

2. Богдан К.С. Средства и системы автоматизации литейного производства. – М.: Машиностроение, 1981.

3. Викер Х. Автоматизация индукционной плавки в литейном производстве // Литейное производство. 1994. № 6.

4. Гитгарц Д.А. Автоматизация плавильных электропечей с применением микро-ЭВМ. – М.: Энергоатомиздат, 1984.

5. Гмурман В.Е. Теория вероятностей и математическая статистика. – М.: Высшая школа, 1977.

6. Горский В.Г., Адлер Ю.П. Планирование промышленных экспериментов (модели статики). – М.: Металлургия, 1974.

7. Горский В.Г., Адлер Ю.П., Талалай А.М. Планирование промышленных экспериментов (модели динамики). – М.: Металлургия, 1973.

8. Дембовский В.В. Автоматизация литейных процессов. – Л.: Машиностроение, 1989.

9 Дрейпер Н., Смит Г. Прикладной регрессионный анализ. – М.: Мир, Статистика, 1973.

10. Заславский М.Л. Автоматизированные системы управления технологическими процессами литья в металлические формы. – М.: НИИмаш, 1980.

11. Иванова Г.М. Теплотехнические измерения и приборы. – М.: Энергоатомиздат, 1984.

12. Инженерно-технологический центр машиностроения "Металлург". Практика применения процесса "Cold-Box" при изготовлении песчаных стержней в производстве отливок из Al-сплавов и чугуна (инструктивный технический материал). – М., 2002.

13. Клюев А.С. Автоматическое регулирование. – М.: Высшая школа, 1986.

14. Клюев А.С. Проектирование систем автоматизации технологических процессов. – М.: Энергия, 1991.

15. Князев С.В. Алгоритм диагностики дефектности отливок и структура АСУ их качеством // Литейное производство. 1992. № 4.

16. Маринин А.М. Информационное обеспечение системы управления автоматической литейной линией // Научная сессия МИФИ-99. Том 11. – М.: МИФИ, 1999.

17. Мушна К. Новые инжиниринговые решения, используемые в формовочном оборудовании фирмы WS // Литейное производство. 2002. № 2.

18. Новиков В.П. Элементы информационного и математического обеспечения проектирования и управления литейными процессами. – М.: МГИУ, 2003.

19. Норенков И.П. Основы автоматизированного проектирования. – М.: Издательство МГТУ, 2002.

20. Пелых С.Г. Компьютерная система управления качеством отливок // Литейное производство. 1991. № 10.

21. Пелых С.Г. Функции распределения параметров литейных процессов // Литейное производство. 1975. № 3.

22. Пелых С.Г., Семесенко М.П. Оптимизация литейных процессов. Киев: Вища школа, 1977.

23. Попов А. Технология производства литейных стержней. Современное состояние и перепективы // Литейное производство. 1992. № 7.

24. Рогинский В.Н. Основы дискретной автоматики. – М.: Связь, 1975.

25. Румшинский Л.З. Организация эксперимента. – М.: МИСиС (ротапринт), 1984.

26. Серебро В.С. Твердение песчано-смоляной смеси при контакте с нагретой оснасткой // Литейное производство. 1979. № 12.

27. Строганов Р.П. Управляющие машины и их применение. М.: Высшая школа, 1986.

28. Терехов В.П., Стройковский А.К. Контроль влажности продуктов обогащения. М.: Недра, 1991.

29. Хенкин В.И. и др. Современные методы и организация технического контроля при производстве отливок. – М.: ВНИИТЭМР, 1987.

30. Чистяков В.С. Краткий справочник по теплотехническим измерениям. М.: Энергоатомиздат, 1990.

31. Чупраков Ю.И. Гидропривод и средства гидроавтоматики. М.: Машиностроение, 1979.

32. Шалимова М.А. Математическое моделирование. Основные понятия. М.: МГИУ, 2002.

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ 3

Глава 1. ОСНОВЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ 7
§ 1. Технологические, конструкторские и организационные методы решения задач управления 7
§ 2. Основные понятия автоматического управления 16
§ 3. Элементные базы систем управления 20
§ 4. Дискретная автоматика. Управление циклом технологической машины 24
§ 5. Автоматическое регулирование 39
Задание для самостоятельной работы 47

Глава 2. ДИНАМИЧЕСКИЕ И СТАТИСТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЛИТЕЙНЫХ ПРОЦЕССОВ 48
§ 1. Динамические свойства регулируемых объектов литейного производства 48
§ 2. Статистические характеристики литейных процессов 53
§ 3. Оценка устойчивости и качества регулирования технологического процесса 56
Контрольные вопросы 68

Глава 3. ИНФОРМАЦИОННЫЕ СРЕДСТВА СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ 70
§ 1. Датчики, приборы и измерительные системы 70
§ 2. Измерение основных механических и физических величин 81
§ 3. Контроль состава и свойств формовочной смеси 97
§ 4. Измерение температуры 106
§ 5. Контроль состава газов 114
Контрольные вопросы 117

Глава 4. СРЕДСТВА УПРАВЛЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМ ПРОЦЕССОМ 118
§ 1. Исполнительные устройства систем управления 118
§ 2. Вычислительная техника управления 125
Контрольные вопросы 141

Глава 5. ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ СХЕМЫ СИСТЕМ АВТОМАТИЗАЦИИ 142
§ 1. Назначение и содержание функциональных схем 142
§ 2. Изображение приборов и средств автоматизации на функциональных схемах 144
§ 3. Функциональные схемы контроля, регулирования и управления 148
Контрольные вопросы 155

Глава 6. АНАЛИЗ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА 156
§ 1. Постановка задачи управления технологическим процессом 156
§ 2. Структурная схема процесса 159
§ 3. Пример. Анализ процесса получения стержней 162
Контрольные вопросы 168

Глава 7. СИНТЕЗ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ 169
§ 1. Методы управления 169
§ 2. Выбор средств измерения и управления процессом 172
§ 3. Пример. Управление процессом получения стержней 174
Контрольные вопросы 183

Глава 8. МЕТОДЫ И АЛГОРИТМЫ УПРАВЛЕНИЯ 184
§ 1. Стабилизирующее регулирование 184
§ 2. Программное управление 192
§ 3. Сглаживание возмущающих воздействий. Регулирование по возмущению 203
§ 4. Логическое управление (загрузка бункеров) 209
§ 5. Дозирование 215
§ 6. Алгоритмы опроса датчиков. Контроль состояния оборудования 222
§ 7. Распознавание образов. Управление качеством отливок. Диагностика состояния оборудования 225
§ 8. Идентификация текущего режима (плавка в дуговой печи) ... 237
§ 9. Управление с обучением (автоматическая абразивная обработка) 241
§ 10. Управление на основе математической модели процесса (оболочковая форма) 245
§ 11. Заливка металла 251
§ 12. Статистические модели. Оптимизация. Управление качеством формовочной смеси 263

§ 13. Автоматическая сортировка и ориентация. Системы технического зрения 274
§14. Контроль процессов и стандарты ISO 9000 281
Контрольные вопросы и практические задания 285

ЗАКЛЮЧЕНИЕ 286

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ 287

Учебное издание

Новиков Владимир Петрович

АВТОМАТИЗАЦИЯ ЛИТЕЙНОГО ПРОИЗВОДСТВА

Часть 1

УПРАВЛЕНИЕ ЛИТЕЙНЫМИ ПРОЦЕССАМИ

Учебное пособие
3-е издание, стереотипное

Редактор *Н.А. Киселева*
Компьютерная верстка *М.В. Федоровой*
Оформление обложки *Д.А. Кошелева*

Санитарно-эпидемиологическое заключение
№ 77.99.60.953.Д.006314.05.07 от 31.05.2007

Подписано в печать 11.03.08
Формат бум. 60x84/16. Изд. № 1-0305(08)
Усл. печ. л. 18,25. Уч.-изд. л. 19,5. Тираж 300
Заказ № 192

Издательство МГИУ, 115280, Москва, Автозаводская, 16

По вопросам приобретения продукции Издательства МГИУ обращаться по адресу:
115280, Москва, Автозаводская, 16
www.izdat.msiu.ru; E-mail: izdat@msiu.ru; тел. (495) 677–23–15

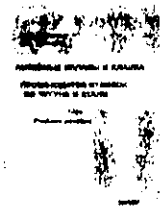
Отпечатано в типографии издательства МГИУ

ISBN 978-5-2760-1524-8

ИЗДАТЕЛЬСТВО МГИУ

105280, Россия, г.Москва, ул.Автозаводская, 16
тел./факс: (495) 674-62-50, 677-21-82, 677-24-92, 677-23-15
WWW.IZDAT.MSIU.RU, e-mail: Izdat@msiu.ru

ПРЕДЛАГАЕМ ВАШЕМУ ВНИМАНИЮ КНИГИ



Романов Л.М., Болдин А.Н.

Литейные сплавы и плавка. Производство отливок из стали и чугуна: Учебное пособие. – М.: МГИУ, 2005. – 48 с.

Включает задачи, касающиеся определения свойства металлических расплавов и качества подготовки их к заливке. Даны типовые решения и необходимая для проведения физико-химических расчетов справочная информация. В конце каждой задачи приводится ответ, что позволяет студенту контролировать правильность решений.

Матвеенко И.В.

Оборудование литейных цехов: Учебное пособие. – М.: МГИУ, 2006. – 172 с.

В учебном пособии изложены: общий анализ процесса уплотнения, принципиальная схема устройства и механизм уплотнения; факторы, влияющие на процесс уплотнения; конструктивные решения механизма для уплотнения смеси, технологические требования к смеси и оснастке. Дается математическое описание рабочего процесса и процесса уплотнения, методика расчета и выбор параметров формовочной машины. Предназначено для студентов специальности «Машины и технологии литейного производства».

Романов Л.М., Болдин А.Н., Грабцев А.Н., Михайлов Д.П.

Электрические печи литейных цехов для выплавки черных и цветных сплавов: Учебное пособие. – М.: МГИУ, 2007. – 104 с.

Раскрываются вопросы теории индукционного нагрева, общие устройства электрических печей, принципы их работы и особенности конструктивных элементов. Предлагаются задачи для самостоятельного расчёта основных конструктивных элементов печи.

Болдин А.Н., Задиранов А.Н.

Основы автоматизированного проектирования: Учебное пособие. – М.: МГИУ, 2006. – 104 с.

Содержит теоретические сведения о современных методах автоматизированного проектирования, принципы их оптимизации, а также задания к выполнению лабораторных работ, контрольные вопросы. Предназначено для студентов направления «Машиностроительные технологии и оборудование», специальности «Машины технология литейного производства».

ИЗДАТЕЛЬСТВО МГИУ

115280, Россия, г.Москва, ул.Автозаводская, 16
тел./факс: (495) 674-62-50, 677-21-62, 677-24-92, 677-23-15
www.izdat.msiu.ru, e-mail: izdat@msiu.ru

ПРЕДЛАГАЕМ ВАШЕМУ ВНИМАНИЮ КНИГИ

Грабчев А.Н.

Основы отраслевых технологий и организация производства: Практикум. – М.: МГИУ, 2007. – 56 с.

Содержит практические работы по основам отраслевых технологий и организации производства. Предназначен для студентов экономических специальностей.

Иванов В.Н.

Специальные виды литья: Учебное пособие. – М.: МГИУ, 2007. – 316 с.

Целью настоящего пособия является пояснение понятий о специальных видах литья. Подробно описаны виды литья, которые начали применяться в последнее время и мало освещены в литературе. Предназначено для студентов литейной специальности в машиностроительных вузах, а также может быть использовано студентами литейной специальности в металлургических вузах и работниками промышленных предприятий.

Матвеенко И.В.

Основы реологии формовочных смесей: Учебное пособие. – М.: МГИУ, 2007. – 80 с.

Представлены как простейшие, так и сложные реологические тела и вывод их математических моделей. Особое внимание уделяется разработке реологической и математической модели формовочной смеси, приборам для испытаний и методике определения реологических параметров формовочной смеси. Впервые с позиции реологии рассматривается новая концепция создания автоматизированных систем управления процессами смесеприготовления и формообразования.

Рязанцев В.И., Овчинников В.В.

Технологические основы контактной сварки легких сплавов: Учебное пособие. – М.: МГИУ, 2006. – 164 с.

Изложены основы технологии контактной сварки легких сплавов. Рассмотрены вопросы подготовки поверхности деталей под сварку, проектирования оборудования, организации производства и контроля качества сварных соединений. Определены направления повышения циклической прочности и коррозионной стойкости сварных соединений. Все технологические процессы контактной сварки даны применительно к типовым конструкциям и деталям из легких сплавов, применяемым в машиностроении.
Для инженерно-технических работников, студентов и аспирантов.

ИЗДАТЕЛЬСТВО МГИУ

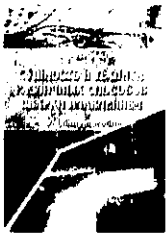
115280, Россия, г. Москва, ул. Автозаводская, 16
тел./факс: (495) 674-62-50, 677-21-82, 677-24-92, 677-23-15
www.izdat.msiu.ru, e-mail: izdat@msiu.ru

ПРЕДЛАГАЕМ ВАШЕМУ ВНИМАНИЮ КНИГИ

Задиранов А.Н.

Основы физической химии в литейном производстве: Учебное пособие. – М.: МГИУ, 2007. – 96 с.

В пособии изложены теоретические основы технологии литья с позиции физической химии. Представлены основные законы, уравнения физической химии. Рассмотрены примеры решения практических задач плавки и литья сплавов на основе железа и цветных металлов.
Предназначено для студентов технических специальностей.



Акулов А.И.

Сущность и техника различных способов сварки плавлением: Учебное пособие. – М.: МГИУ, 2006. – 104 с.

Рассмотрены сущность и техника способов сварки плавлением: газовой, электродуговой, электродами с покрытием, под флюсом, в защитных газах, электрошлаковой, электронным лучом и лазером.
Для студентов, обучающихся по направлению "Машиностроительные технологии и оборудование" и специальности "Оборудование и технология сварочного производства"

Шуляк В.С.

Проектирование литейных цехов: Учебное пособие. – М.: МГИУ, 2007. – 92 с.

Учебное пособие для дипломного проектирования состоит из четырех частей и приложения. В первой части изложены требования, предъявляемые к структуре и содержанию дипломного проекта. Вторая часть содержит план пояснительной записки дипломного проекта. В третьей части в форме таблиц приведены сведения по оборудованию литейных цехов. В четвертой части даны примеры отдельных фрагментов строительной части дипломного проекта. Приложение включает планировки отдельных видов литейного оборудования.

Овчинников В.В.

Технология сварки алюминиевых сплавов: Учебное пособие. – М.: МГИУ, 2007. – 68 с.

Рассмотрены технологические особенности сварки алюминиевых сплавов. Приведены данные о сварочных материалах и особенностях технологии сварки. Для студентов, обучающихся по направлению «Машиностроительные технологии и оборудование» и по специальности «Оборудование и технология сварочного производства»

ИЗДАТЕЛЬСТВО МГИУ

115280, Россия, г.Москва, ул.Автозаводская, 16
тел./факс: (495) 674-62-50, 677-21-82, 677-24-92, 677-23-15
WWW.IZDAT.MSIU.RU, e-mail: izdat@msiu.ru

ПРЕДЛАГАЕМ ВАШЕМУ ВНИМАНИЮ КНИГИ

Клепиков В.В., Голов В.А., Порошин В.В.

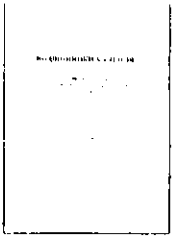
Качество изделий. Учебное пособие. – М.: МГИУ, 2006. – 252 с.

Раскрываются параметры качества изделий, геометрические и функционально-механические свойства поверхностного слоя изделий. Значительное внимание уделяется геометрическим параметрам микронеровностей профиля. Раскрыты новые направления в области трехмерного анализа топографии поверхностного слоя

Аверьянов О.И., Аверьянова Г.Н., Толмачев С.А.

Компоновки металлорежущих станков: Учебное пособие. – М.: МГИУ, 2007. – 168 с.

Учебное пособие по дисциплине «Металлорежущие станки» предназначено для студентов высших технических образовательных учреждений, которые обучаются по специальности «Технология машиностроения»



Морев В.Г.

Подшипники качения: Методические указания. – М.: МГИУ, 2007. – 55 с.

Дана краткая характеристика, назначение, применение, принципы выбора полей допусков и посадок подшипников качения, примеры, необходимые справочные материалы. Предназначено для изучения курса "Метрология, взаимозаменяемость, стандартизация и сертификация" и выполнения курсовых работ

Аверьянова И.О., Аверьянов О.И.

Кинематика металлорежущих станков: Учебное пособие. – М.: МГИУ, 2006. – 52 с.

Учебное пособие подготовлено для студентов высших учебных заведений, обучающихся по специальностям «Технология машиностроения» и «Проектирование и эксплуатация автоматизированного производства»