

Запропоновано використання принципу типізації для формування аналітичного опису керованих технологічних процесів у ливарному виробництві. Показано, як різні процеси можуть бути описані ідентичними простими математичними моделями з метою подальшого синтезу оптимальних регуляторів найбільш важливих технологічних параметрів. Використання типізації дозволяє отримати працездатні моделі для синтезу систем керування технологічними процесами на різних ділянках ливарних цехів

Ключові слова: система диференціальних рівнянь, оптимальний регулятор, електродугова піч, стержневий автомат, сумішераздача

Предложено использование принципа типизации для формирования аналитического описания управляемых технологических процессов в литейном производстве. Показано, как различные процессы могут быть описаны идентичными простыми математическими моделями с целью дальнейшего синтеза оптимальных регуляторов наиболее существенных технологических параметров. Использование типизации позволяет получить работоспособные модели для синтеза систем управления технологическими процессами на различных участках литейных цехов

Ключевые слова: система дифференциальных уравнений, оптимальный регулятор, электродуговая печь, стержневой автомат, смесераздача

ТИПИЗАЦИЯ МАТЕМАТИЧЕСКОГО ОПИСАНИЯ В ЗАДАЧАХ СИНТЕЗА ОПТИМАЛЬНОГО РЕГУЛЯТОРА ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ЛИТЕЙНОГО ПРОИЗВОДСТВА

Д. А. Дёмин

Доктор технических наук, профессор
Кафедра литейного производства
Национальный технический университет
«Харьковский политехнический институт»
ул. Фрунзе, 21, г. Харьков, Украина, 61002
E-mail: c7508990@gmail.com

1. Введение

Вопросы автоматизации технологических процессов производства вообще, и литейного производства в частности сегодня по праву являются приоритетными.

Обоснованием этого может считаться хотя бы тот очевидный факт, что в жесткой конкурентной борьбе сегодня побеждает производитель, который может обеспечить более высокое качество своей продукции. Вряд ли при этом стоит говорить, что снижение субъективизма как в оценке параметров технологических процессов и принятия решений, так и в выборе и реализации вариантов управления этими процессами, является определяющим. Естественно, что формирование предпосылок для этого – это создание математических моделей, которые могли бы быть использованы для решения задач поиска оптимального управления технологическими процессами в реальном промышленном производстве.

Однако, такое понятие, как «создание математических моделей» уже само по себе предполагает не только, и даже не столько, всестороннее владение математическим аппаратом, сколько глубокое знание предметной области, в частности специфики формализуемых технологических процессов, а также

творческий подход самого исследователя, взявшего на себя труд по созданию аналитического описания таких процессов.

Все очень усложняется еще в том случае, если формализуемый процесс «отягощен» не только возмущающими факторами, а факторами многоуровневой неопределенности – именно к таким крайне сложным для формализации процессам и относятся процессы литейного производства. Рассматривая укрупнено реализуемые в литейных цехах технологические процессы по основным участкам цеха (плавильный, смесеприготовительный, стержневой, формовочный, термообрубной), можно сказать, что ни одна универсальная математическая модель не может быть взята за основу для решения всего комплекса задач автоматизации. Ведь на каждом из участков происходят совершенно различные преобразования материалов в цепочке «сырьё – продукт».

Сам процесс преобразования на каждом из них включает в себя совершенно различные физические, физико-химические, тепловые и т.д. процессы. Например, определяющими процессами на участке плавки являются физико-химические и тепловые процессы преобразования твердой шихты в расплав заданного химического состава и свойств; на участке формовки – механические процессы подачи смеси

и уплотнения песчаных форм; на стержневом – механические, химические и тепловые процессы формирования готовых стержней из стержневой смеси и т. д.

Поэтому математические модели, описывающие технологические процессы на каждом из участков априори не могут быть простыми, ведь они должны содержать аналитические описания параметров процессов с учетом их физической природы. Исключения, правда, могут составлять регрессионные уравнения, однако и для их построения, особенно в условиях малой выборки экспериментальных данных и при наличии многоуровневой неопределенности, существуют объективные сложности и определенная трудоемкость [1].

Тем не менее, задачи поиска работоспособных на практике моделей должны решаться, и к ним, в первую очередь, должно предъявляться требование простоты (разумеется, они должны адекватно описывать управляемый процесс).

Перспективной при таком рассмотрении может быть типизация, смысл которой заключается в выявлении общих закономерностей математического описания технологических параметров, учитываемых в различных процессах литейного производства: плавки, раздачи смеси, изготовления форм и стержней и т. д.

Решение задачи типизации позволит получить простые математические модели, которые могут быть использованы в практических задачах синтеза оптимальных систем регулирования, а потому может считаться актуальным для теории и практики управления технологическими процессами литейного производства.

Исходными предпосылками для решения задачи типизации является обязательное использование в различных технологических процессах литейного производства общих технологических параметров, существенно влияющих как на сам управляемый процесс, так и на формирование качества получаемого продукта и производительность.

Целесообразно рассмотреть задачу типизации для нескольких основных процессов, реализуемых в плавильном, стержневом, смесеприготовительном и формовочном участках литейного цеха. Это, в первую очередь, процессы изготовления стержней и раздачи формовочной или стержневой смеси, процессы плавки и термовременной обработки. Для этого необходим анализ типовых технологических процессов на соответствующих участках литейного цеха.

2. Цели и задачи исследования

Целью исследования является получение типового математического описания для различных процессов литейного производства: смесераздачи, изготовления стержней в нагреваемой оснастке, термовременной обработки в электропечи-миксере.

Для достижения поставленной цели сформулированы следующие задачи:

– выявить существенно влияющие технологические параметры в исследуемых процессах,

– показать возможность типизации математического описания управляемых процессов на различных участках литейного цеха,

– получить математическое описание и показать возможности его использования для синтеза оптимальных регуляторов технологических параметров исследуемых процессов.

3. Анализ литературных данных

Обобщение информации о рынке оборудования стержневых участков литейных цехов [2] свидетельствует о том, что современные мировые производители большой акцент делают не только на оборудовании, позволяющем реализовывать «модные» сегодня ХТС-процессы с продувкой газом. Большой акцент сделан на изготовление универсальных стержневых автоматов, позволяющих реализовывать как Cold-box (Cold-box-amin, MF, CO₂), так и Hot-box процессы изготовления стержней.

Причем характерно, что некоторые производители стержневого оборудования воплощают реализацию ХТС-процессов в компоновку универсальных пескодувных стержневых машин [3], сохраняя, при этом, линейку машин, работающих с нагреваемой оснасткой, в горячих ящиках.

Типовые технологические процессы изготовления стержней в горячих ящиках, применяемые в литейных цехах, можно найти в работе [4], в ней в частности, отмечено, что в данных технологиях применяются пескодувные или пескострельные полуавтоматы, в которых стрержни получают из влажных горячествердеющих смесей (ГТС), основой которых является отмытый от примесей кварцевый песок, а связующими – синтетические смолы (ФМ-1, К.Ф-40, КВС, фенолоспирт и др.).

В качестве катализаторов – ускорителей твердения смесей используют растворы минеральных и органических кислот, хлориды, ангидриды и некоторые соли.

Технологический процесс изготовления полого стержня на пескострельной машине по горячим ящикам включает операции (рис. 1): сборку нагретого до 240 – 300 °С ящика 5, опускание пескострельной головки 1 и надув смеси в ящик из сопла 2 (рис. 1, а), после чего стержень формируется в ящике в течение 10 – 20 с.

В дальнейшем стержень твердеет на воздухе; подъем пескострельной головки, опускание вставки опустошителя 7 и отвод половины ящика вправо пневматическим цилиндром 6 (рис. 1, б); поворот левой половины ящика на 90° и выталкивание стержня 8 из ящика толкателями 9 плиты 4, поднимаемой пневматическим цилиндром 3; удаление стержня вилочным съемником (рис. 1, в); окраска стержня водной противопопригарной краской; подсушка окрашенного стержня при температуре 250 – 280 °С в течение 15 – 30 с.

Разновидностью описанного технологического горячего процесса является вариант, при котором смесь надувают в холодный ящик, а твердеет она при продувке нагретым воздухом.

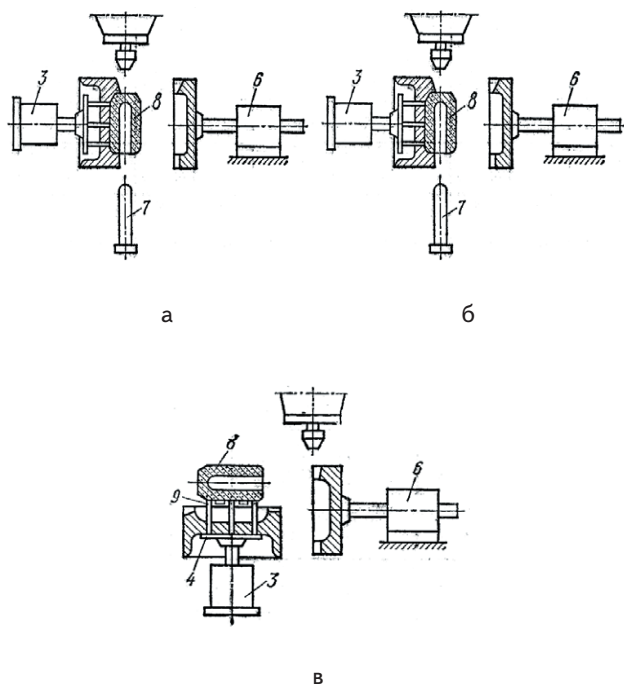


Рис. 1. Схема изготовления полых стержней в горячих ящиках [4]: а – операции сборки нагретого ящика, опускания пескострельной головки и надува смеси в ящик; б – операции подъема пескострельной головки, опускания вставки опустошителя и отвода половины ящика вправо; в – операции поворота левой половины ящика на 90°, выталкивания и удаления стержня

Заслуживают особого внимания современные технологии изготовления стержней от компании «Химическое предприятие Hüttenes-Albertus GmbH» (Хюттенес-Альбертус) [5], в частности технологии производства стержней с использованием неорганического связующего Cordis. Cordis – это неорганическое связующее, основу связывающего вещества в котором составляет комбинация модифицированных фосфатов, силикатов и боратов. Отверждение стержней в стержневом ящике происходит за счет удаления воды.

Суть технологии заключается в том, что стержневая смесь выстреливается в подогретый стержневой ящик, температура подогрева которого, в зависимости от геометрии стержня, находится в пределах от 100 °С до 120 °С. Особое внимание уделяется равномерному распределению тепла в системе «оснастка – стержень».

После того, как смесь песка и увлажненного крепителя попадет в стержневой ящик, образуется наружная корка стержня. Это первый этап отверждения в процессе сушки, при котором влага стержня удаляется. Это и есть чисто физический процесс отверждения (рис. 2). Дополнительно, в зависимости от типа применяемого Cordis-связующего, может проходить и химическое отверждение. Как следствие, достигается более высокая прочность при срыве стержней, чем при обычном физическом процессе твердения (сушки). В зависимости от выбора песка и типа связующего, при содержании крепителя в диапазоне (1,5 – 3) %, достигается прочность на изгиб 350 – 550 Н/мм².

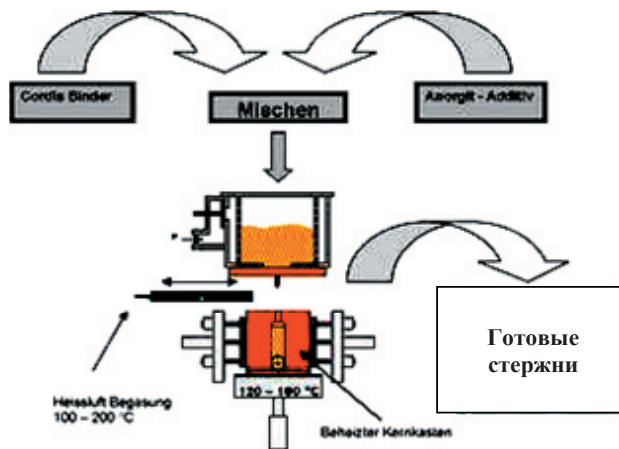


Рис. 2. Процесс изготовления стержней с использованием связующего Cordis [5]

Для изготовления стержней по технологиям горячего отверждения (Hot-box – процесс) могут использоваться пескострельные стержневые автоматы «АНВ» [6, 7]. По своей конструкции – это однопозиционные универсальные машины, последовательность работы исполнительных механизмов в которой реализует электронная система управления «IPC» и шинной системой Ehternet в электрошкафу. Пульт управления машиной оснащен сенсорной панелью «Touch Screen» для ввода данных и индикации. Все машины имеют стандартное программное обеспечение WINDOWS XP, обеспечивающее контроль работы машины с диагностикой и русскоязычной индикацией возникших неполадок на дисплее. В памяти машины сохраняются данные для настроек оператора и данные по каждому стержневому ящику, в том числе оптимальные режимы надува и продувки, рецептура стержневой смеси (номер рецепта смеси). Все основные настройки рабочих параметров, включая все параметры надува и продувки, регулируются через сенсорную панель на пульте управления. При этом не требуется механической регулировки клапанов давления и реле, что значительно упрощает работу оператора. Для нагрева оснастки в стержневых машинах АНВ по технологии Hot-box, они комплектуются либо плитами электрического нагрева стержневого ящика, либо панелями газового нагрева.

Несколько серий стержневых автоматов для изготовления стержней с температурным отверждением предлагает фирма Laempе & Mössner GmbH [8] – серии LL и LFB, а также ОАО «БЕЛНИИЛИТ» [9], причем в машинах конструкции ОАО «БЕЛНИИЛИТ» реализуется пескодувный метод уплотнения песчано-смоляной смеси в нагреваемом стержневом ящике.

Во всех перечисленных конструкциях машин должны использоваться регуляторы температуры, независимо от того, какой метод нагрева оснастки применяется – электрический или газовый. При этом главной задачей такой системы, являющейся, по сути, системой стабилизации технологических параметров, является поддержание температуры в заданном диапазоне. Последний регламентируется технологическим процессом, в т. ч. рецептурой используемой стержневой смеси, конструкцией и геометрией изготовли-

ваемых стержней. Описание математических моделей или структуры системы регулирования температурных режимов стержневой оснастки в научно-технической периодике не обнаружено. Вероятной причиной этого является закрытость информации производителями стержневых автоматов, системы управления которыми являются теми составляющими, которые обеспечивают технические преимущества их оборудования на рынке. Построение математических моделей, которые могут быть использованы в процессах изготовления стержней по нагреваемой оснастке, ориентировано, в первую очередь, на разработку математических моделей формирования прочности терморезистивных смесей. Такие модели базируются на основных физико-механических и физико-химических факторах процесса отверждения и учитывают статистическую природу огнеупорного наполнителя. Выходными переменными в основном выбирается плотность стержней, а входными – количество содержания в смеси связующей композиции. Такие модели строят на основе статистической обработки экспериментальных данных [10].

Основным технологическим параметром во всех описанных вариантах реализации процессов изготовления стержней является температура нагреваемой оснастки – именно она при выбранной рецептуре смеси является тем определяющим фактором, который обеспечивает получение качественных стержней через сложные физико-механические и физико-химические механизмы их отверждения.

Типовые схемы системы смесеприготовления и устройства для дозирования сыпучих компонентов формовочных и стержневых смесей приведены на рис. 3 и рис. 4 соответственно [4].

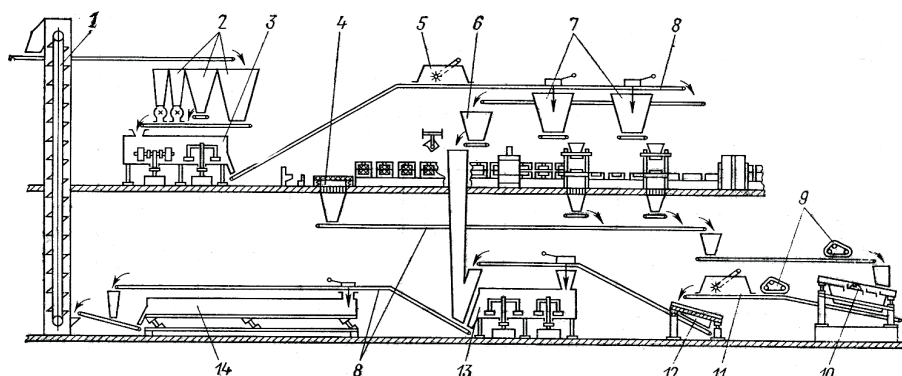


Рис. 3. Схема замкнутой транспортно-технологической системы смесеприготовления для сырой формовки: 1 – ленточный элеватор; 2 – бункеры для компонентов смеси над бегунами; 3 – бегуны непрерывного действия; 4 – выбивная решетка с бункером; 5 – азратор готовой смеси; 6 – бункер для излишков смеси; 7 – бункеры над формовочными автоматами; 8 – системы ленточных конвейеров; 9 – магнитные железотделители; 10 – сито тонкой очистки; 11 – азратор для оборотной смеси; 12 – питатель; 13 – смешивающий охладитель; 14 – охладитель вибрационный

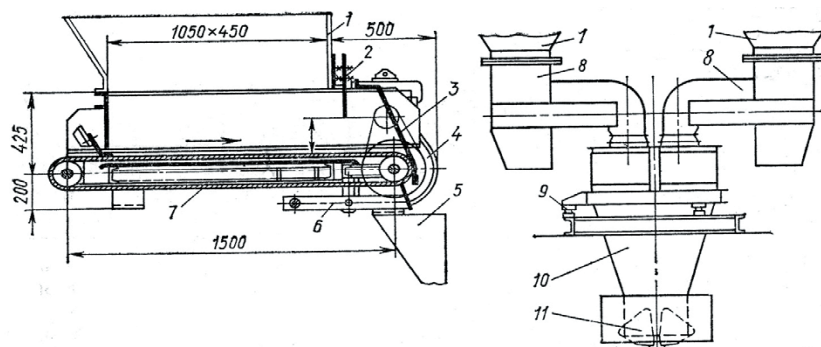


Рис. 4. Устройства для дозирования сыпучих компонентов смесей: а – ленточный объемный дозатор; б – бункерный весовой дозатор; 1 – бункер для готовой смеси; 2 – регулирующий шибер; 3 – штора; 4 – привод; 5 – лоток для смеси; 6 – скребок; 7 – ленточный конвейер; 8 – ленточный питатель; 9 – тензодатчики; 10 – весовая емкость; 11 – челюстной затвор с пневмоприводом

Обобщение данных о рынке оборудования для систем смесераздачи в литейных цехах на участках смесеприготовления, стержневом и формовочном участках [2] позволяют сделать вывод о том, что при проектировании таких систем стремятся максимально учесть возможности интеграции их в АСУ ТП литейного цеха. Одним из лидеров в этом направлении является компания "Айрих" [11], специализирующаяся на поставках смесительной техники для получения связанного бентонитом формовочного песка (песчано-глинистой формовочной смеси) [12]. Смесители данного производителя оснащены программой для регулировки параметров, позволяющей достигать высокую эффективность процесса смешения, в частности за счет использования весовой системы для отработанного песка, ингредиентов и воды. Программируемая система управления и регулирования процессом включает модули визуализации производственного процесса, процессор дозировки компонентов и, собственно, силовой узел. Схема производственной установки со стандартной системой воздушного охлаждения показана на рис. 5.

Благодаря интенсивному смешиванию, обеспечивается высокое качество формовочных смесей, которое очень важно для современного литейного производства. Это касается как производства при атмосферном давлении с обычным воздушным охлаждением, так и производства по уникальной технологии EVACTHERM®. Последняя применяется в тех случаях, когда требуется смешение и охлаждение; при высокой термической нагрузке формовочной смеси, а также в том случае, если расход формовочной смеси составляет более 40 м³/ч.

Принцип EVACTHERM® основан на зависимости температуры кипения воды от давления окружающей среды. При вакуумном произ-

водстве, благодаря регулировке давления в смесителе, можно производить точную установку температуры и влажности смеси. Вакуумное охлаждение происходит благодаря испарению воды, т. е. отводу тепла во время процесса смешения. Таким образом, обычный смеситель превращается в охлаждающий смеситель, причем в форме одной установки.

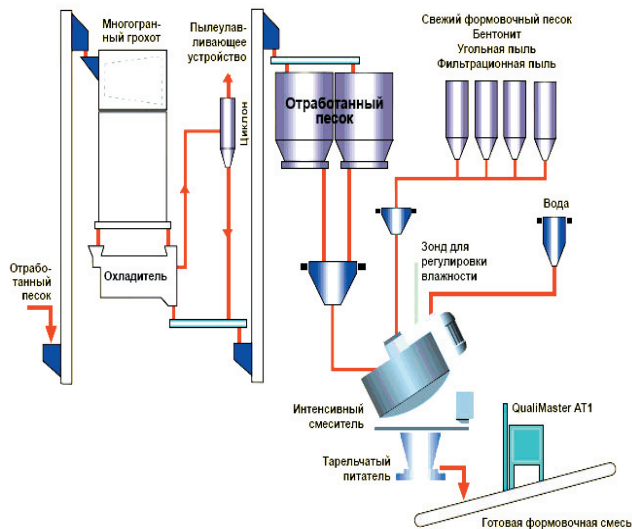


Рис. 5. Схема производственной установки со стандартной системой воздушного охлаждения [12]

В смеситель EVACTHERM® автоматически поступает дозируемое количество воды для охлаждения отработанного песка до температуры 40 °С, увлажнения отработанного песка до достижения влажности готовой смеси. Испаряемая в процессе охлаждения вода подвергается конденсации и подается в процесс в следующем рабочем цикле. Отвод тепла производится в замкнутом круге посредством теплообменника. Процесс приготовления формовочной смеси в смесителе EVACTHERM® с вакуумным охлаждением представлен на рис. 6.

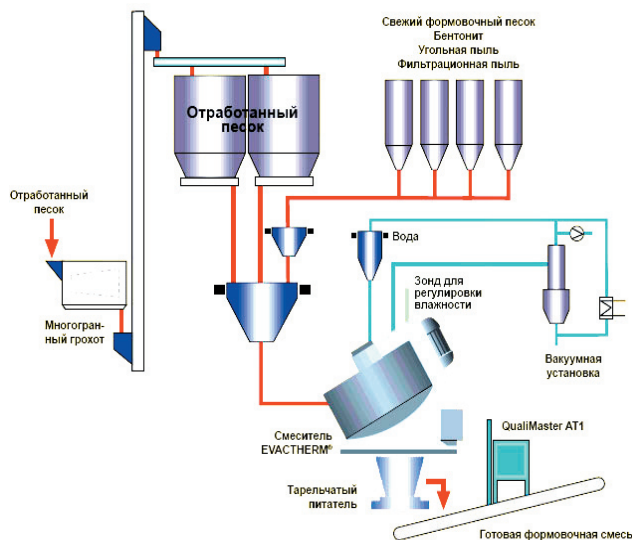


Рис. 6. Процесс приготовления формовочной смеси в смесителе EVACTHERM® с вакуумным охлаждением [12]

В смесителях Айрих используется система регулирования и измерения Айрих QualiMaster AT1. Для определения качества измеряются, оцениваются и документируются в режиме on-line такие параметры, как: уплотняемость, прочность на срез; прочность при сжатии.

Система QualiMaster AT1 устанавливается непосредственно после смесителя на участке готового песка и оснащена обособленной локальной системой управления для простой настройки и контроля. Устройство для отбора проб заполняет встроенные контрольные цилиндры определенным количеством песка. Контрольные цилиндры, вращающиеся в заданном такте, проходят через контрольную станцию. Все измеряемые значения обрабатываются пакетами программного обеспечения SandReport или SandExpert. Измеряемые фактические показатели передаются в систему управления через соответствующие интерфейсы. Отклонения от номинальных показателей ведут к автоматической корректировке влажности в зависимости от уплотняемости и корректировке дозировки добавок (бентонит, углерод, фильтровая пыль) в зависимости от прочности на срез или прочности на сжатие.

Схема системы управления оборудованием QualiMaster AT1/ SandReport/ SandExpert показана на рис. 7.

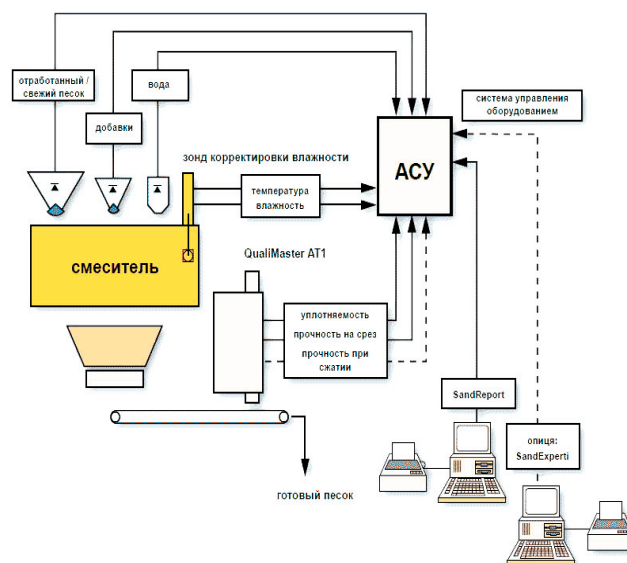


Рис. 7. Схема системы управления оборудованием QualiMaster AT1/ SandReport/ SandExpert [12]

Как следует из описанных выше систем, основным технологическим параметром в реализации процессов смесераздачи является расход сыпучих или жидких компонентов смесей и связанный с ним параметр уровня компонентов в бункерах системы смесераздачи. Это обстоятельство является ключевым и во всех без исключения других системах смесераздачи.

Для выявления типовых технологических параметров, описывающих управляемые процессы плавки, следует учесть специфику плавильного оборудования. Учитывая, что в условиях отсутствия качественных компонентов шихты и необходимости переплава крупногабаритных компонентов шихты

предпочтение отдается электродуговым печам, целесообразно данный вопрос решать для процессов электродуговой плавки.

Ряд моделей, применяемых для управления сложными электротехнологическими комплексами, к числу которых относятся и электродуговые печи, приведены в работе [13].

Авторами данной работы предложена разработка модели объекта управления как многоэтапного условно-экстремального целенаправленного процесса, обобщенная математическая модель которого имеет вид условного отображения

$$\bar{F}: \bar{X} \Rightarrow \bar{Y} | Q, B, S, T, \quad (1)$$

где \bar{X} – вектор входов, \bar{Y} – пространство выходов, Q – пространство ограничений на процессы машинного исследования, B – ограничения на объект проектирования по влаго-, химо-, термостойкости, вибростойкости, чувствительности систем измерительной техники, эксплуатационной надежности, энергоемкости, S – пространство реакции процесса проектирования на воздействия окружающей среды, T – время, \bar{F} – условный оператор.

Вместе с тем, для предотвращения возникающих системологических трудностей, возникающих при этом на этапе моделирования, авторы [14, 15] предлагают подход, основанный на рассмотрении модели электротехнологического комплекса как «черного ящика» [16, 17], а также методологию решения частных задач моделирования и конструирования схмотехнических решений. При этом рекомендуется использование следующих основных принципов [18, 19]: развиваемости – система моделирования должна пополняться новыми математическими методами, расширяться в методологическом и функциональном плане без значительных затрат на модернизацию; инвариантности – модель должна иметь специальное математическое, информационное и методологическое обеспечение, инвариантное относительно конкретного технического обеспечения; модульности – модель организуется по иерархическому принципу, допускающему подключение новых модулей различного уровня.

Авторами работы [20] отмечается, что целью управления процессом электроплавки, наряду с получением металла заданного качества, с энергетической точки зрения, является высокая энергоэффективность всех основных и вспомогательных технологических процессов. Среди основных факторов, влияющих на эксплуатационный соф, авторы [20] выделяют: электрическую мощность, напряжение питающего тока (длина дуги), состав шихты, количество и состав присадок, карбюризаторов, расход кислорода, электромагнитное перемешивание ванны расплава, раскислители. Поэтому модель для управления процессами плавки должна описывать динамику функционирования короткой сети, т. е. включать в себя параметры, отражающие теплоэнергетические процессы преобразования энергетических потоков в технологическую теплоту плавления при учете электроэнергии и «садки». В качестве такой модели авторы [20] приводят дифференциальное уравнение вида

$$\frac{d^2 Q}{dt^2} + f(Q) \frac{dQ}{dt} + g(Q) = 0, \quad (2)$$

где Q – энергетический эквивалент технологической теплоты; $f(Q)$ – декрементирующая функция тепловой способности альтернативных источников энергии (природного газа, кислорода, карбюризатора, окислителя, раскислителя и пр.); $g(Q)$ – функция энергетической эквивалентности указанных энергетических потоков, имеющая существенный нелинейный характер с дестабилизирующими факторами, способствующими энергетическим процессам обмена между расплавом ванны и синтетическим шлаком величиной Q ; и скоростью обмена.

В работе [21] сформулирована задача получения динамических моделей регулирования координат электротехнологического комплекса электроплавки с точки зрения наилучшей точности при оптимальной идентификации [22 – 25], базирующаяся на алгоритмах синтеза оптимальных тестирующих сигналов (команд управления) директивной структуры в соответствии с выбранным критерием оптимальности динамического функционирования технологии электроплавки.

Вышеуказанный критерий энергосбережения формируется на основе двух основных признаков оптимальности [21]:

1. Критерии, отражающие точность оценок параметров [23]:

а) критерий D-оптимальности, согласно которому входные воздействия системы должны удовлетворять условию:

$$\det M[U_0(t)] = \max_{U(t) \in \Omega_U} \det M[U(t)], \quad (3)$$

где M – матрица (оператор) математического ожидания; U – управление; Ω_U – область, отражающая технологические ограничения на параметры управления $\{U\}$;

б) критерий A-оптимальности, реализация которого направлена на минимизацию следа дисперсионной матрицы оценок параметров

$$t_r \{M^{-1}[U_0(t)]\} = \min_{U(t) \in \Omega_U} t_r \{M^{-1}[U(t)]\}, \quad (4)$$

где $t_r\{\}$ – оператор следа матрицы (суммы ее диагональных элементов);

в) критерий E-оптимальности, реализующий композиционный план, удовлетворяющий условию

$$\lambda_{\max} \{M^{-1}[U_0(t)]\} = \min \max \lambda_i \{M^{-1}[U(t)]\}, \quad (5)$$

где M^{-1} – обратная матрица; λ_i – собственное число матрицы $M^{-1}[U(t)]$.

2. Критерии, связанные с точностью оценок выходных параметров качества функционирования системы:

а) критерий G-оптимальности, который определяет G-оптимальность входного сигнала (директивной технологической команды) $U(t)$, если он удовлетворяет условию

$$\bar{Q}^T M^{-1} [U_0(t)] \bar{Q}(t) = \min \max \bar{Q}(t) M^{-1} [U(t)] \bar{Q}(t), \quad (6)$$

где \bar{Q}^T – транспонированная матрица.

Такой сигнал управления потоком $Q(t)$ является матрицей командных (директивных) воздействий и он минимизирует среднюю по области дисперсию оценки выходных показателей регулирования координат электротехнологического комплекса «дуговая печь – короткая сеть – ванна расплава металла».

б) критерий Q-оптимальности [22], который реализует Q-оптимальный алгоритм минимизации средней по области дисперсии оценки выхода системы

$$\int_0^T \bar{Q}^T(t) M^{-1} [U_0(t)] \bar{Q}^T(t) dt = -\min \int_0^T \bar{Q}^T(t) M^{-1} [U(t)] \bar{Q}^T(t) dt. \quad (7)$$

С использованием описанных подходов к получению моделей управления авторами работы [26] получена динамическая модель энергоинформационных потоков электротеплового и электротехнического режимов электродуговых печей постоянного и переменного тока. Такая модель учитывает в своей структуре энерго-информационные связи между технологическим обеспечением (S1-связи) и технологическими процессами (S2-связи). Оценка S1-связей определяет степень влияния стратегии и направления развития электрометаллургии, а S2-связей – значимость их реализации. Между ними могут существовать и S3-связи, как связи интеграции, аккумулирующей в себе эффективность отрасли в целом.

В работе [27] отмечается, что актуальным для управления электродуговой плавкой является автоматическое регулирование параметров электрической дуги, основным параметром которой может быть названа ее мощность, непосредственно влияющая на интенсивность нагрева жидкого металла. В связи с этим необходимо располагать математической моделью, которая дает возможность идентифицировать напряжение и мощность на дуге для оптимизации процесса плавки металла по расходу электроэнергии. Такая необходимость продиктована существующей трудностью, связанной с измерением и эксплуатационным контролем напряжения дуги по ходу плавки [28].

Авторами данной работы отмечено, что для мощных электродуговых печей действующее значение напряжения дуги практически постоянно при неизменной длине дуги, т.е. не зависит от действующего значения силы тока, а поэтому для описания дуги в электродуговой печи может быть использовано дифференциальное уравнение, связывающее ток и падение напряжения на дуге [29, 30]:

$$T \frac{dg(t)}{dt} = \left[\frac{i^2(t)}{U_d^2} - g^2(t) \right] g(t)^{-1}, \quad (8)$$

где T – постоянная времени дуги; $i(t)$, $g(t)$ – ток и проводимость дуги; U_d – действующие значение напряжения на дуге.

Передачная функция дуги по мощности при этом имеет вид

$$W_{\text{дуги}}(p) = \frac{P_d}{P_c} = \frac{R_d}{R_c} = \frac{\beta}{T_d p + 1} = \frac{i}{T_d p + 1}, \quad (9)$$

где T_d – постоянная времени дуги, при рафинировании составляет (3...8) мс [31], β – относительное действующее напряжение на дуге, равное 0,4–0,6 в восстановительный период [32].

Приведенные результаты исследований, посвященных математическому моделированию процессов электродуговой плавки, позволяют сделать один важный вывод. Все они практически ориентированы на получение моделей, описывающих процесс энергетическими параметрами и при всей своей объективной эффективности с точки зрения управления электродуговой плавкой, не в достаточной степени учитывают влияние технологических параметров данного процесса на качество получаемого продукта. Кроме этого, моделирование относится только к этапу плавки, процессы же термовременной обработки до выдачи расплава из печи на конвейер не рассматриваются вовсе. Исключение составляют работы [33 – 35], в которых исследованы вопросы математического моделирования технологических процессов именно для этого этапа. Сама печь при этом рассматривается в качестве миксера, а одним из основных параметров выступает температура ванны на этапе выдержки расплава в печи в интервалах времени между выдачей его на конвейер разными порциями. Последние диктуются оптимальными технологическими схемами плавки [34].

4. Формирование математических моделей технологических процессов на основе принципа типизации

4. 1. Математическое моделирование процессов в системе смесераздачи

Как было показано выше, основным технологическим параметром в системе смесераздачи может выступать уровень сыпучего или жидкого в бункерах. Принципиальная схема системы регулирования уровня жидкого (сыпучего) компонента смеси или уровня готовой для подачи в стержневой (формовочный) автомат смеси показан на рис. 8.

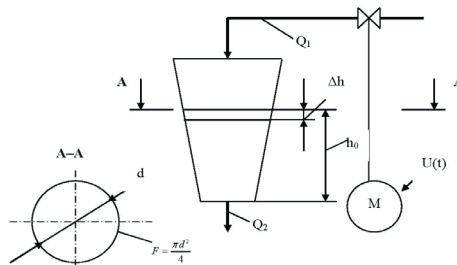


Рис. 8. Схема системы регулирования уровня компонента смеси

На рис. 8 приняты следующие обозначения: h_0 – начальный уровень компонента (смеси), Δh – пере-

пад высоты компонента (смеси) в бункере, Q_1 – расход компонента (смеси) через питатель, Q_2 – расход компонента (смеси) при выдаче потребителю, в качестве которого может выступать последующий в технологической цепочке бункер, питатель, или конечный потребитель (смеситель, стержневой или формовочный автомат), F – площадь сечения бункера, d – диаметр бункера, M – исполнительный механизм, приводящий в действие регулирующий орган (заслонку на питателе), $U(t)$ – управляющий сигнал.

Принцип действия системы регулирования уровня может быть описан следующим образом. Повышение расхода отбираемой смеси Q_2 вызывает резкое падение уровня смеси в бункере с начальной высоты h_0 на величину Δh . Такое изменение воспринимается системой как единичное скачкообразное входное воздействие и сигнал управления приводит в действие регулирующий орган, открывающий заслонку питателя на величину, обеспечивающую компенсацию расхода смеси Q_2 – происходит увеличение расхода Q_1 компонента (смеси) через питатель.

Если принять упрощенно, что бункер имеет вид цилиндра, то математическая модель, описывающая процесс изменения уровня в бункере, может быть представлена следующим образом:

$$F \frac{dh}{dt} = Q_1 - Q_2 \tag{10}$$

Если в качестве исполнительного механизма выступает электродвигатель и скорость вращения вала электродвигателя пропорциональна величине и знаку приложенного напряжения, аналитическая зависимость изменения расхода компонента (смеси) через питатель от приложенного к электродвигателю напряжения имеет вид

$$\frac{dQ_1}{dt} = kU \tag{11}$$

где k – интегральный коэффициент, учитывающий влияние характеристик конкретного электропривода и заслонки.

Если ввести замену переменных: $x_1 = \Delta Q_1$ – изменение расхода смеси через питатель, $x_2 = F\Delta h$ – изменение объема смеси в бункере при увеличении расхода Q_2 , $q = \Delta Q_2$ – изменение расхода смеси при выдаче её из бункера потребителю, $u = kU$ – управление, пропорциональное напряжению, приложенному к электродвигателю, то можно записать систему дифференциальных уравнений (СДР), описывающую изменение расхода смеси в бункере:

$$\begin{cases} \frac{dx_1}{dt} = u, \\ \frac{dx_2}{dt} = x_1 - q. \end{cases} \tag{12}$$

Здесь следует отметить, что если в качестве исполнительного механизма используется пневмо- или гидроцилиндр, уравнение $u = kU$ будет таким же, как и для электропривода с той лишь разницей, что в качестве переменной $U(t)$ будет выступать переменная

$p(t)$, т. е. давление в пневмо- или гидроцилиндре. В этом случае параметр k является интегральным коэффициентом, учитывающим влияние характеристик конкретного пневмо- или гидропривода и заслонки.

СДР вида (12) и представляет собой математическую модель, описывающую изменение уровня в бункере системы смесераздачи.

4. 2. Математическое моделирование процессов изготовления стержней по нагреваемой оснастке

Как было отмечено выше, основным технологическим параметром в процессе изготовления стержней по нагреваемой оснастке является температура оснастки (стержневого ящика). Система регулирования данного параметра является системой стабилизации и решает задачу поддержания заданного технологическим процессом температурного диапазона. Получение математического описания может быть рассмотрено на примере двухпозиционного стержневого карусельного автомата, предназначенного для изготовления стержней в горячих ящиках с горизонтальным разъемом. Схема автомата показана на рис. 9.

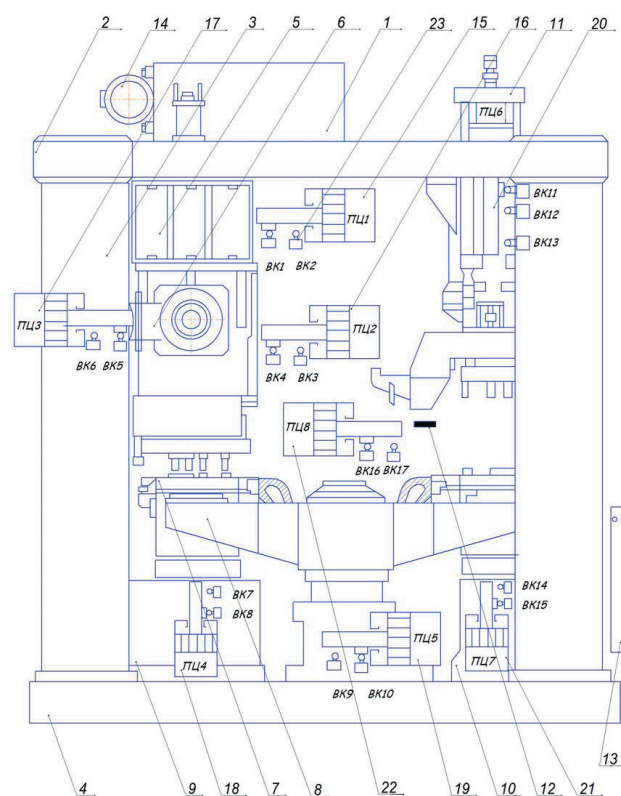


Рис. 9. Схема двухпозиционного стержневого карусельного автомата, предназначенного для изготовления стержней в горячих ящиках с горизонтальным разъемом

Автомат (рис. 9) состоит из основы с трубопроводами 4, на которой крепятся две колонны 3, на которые, в свою очередь, крепятся траверсы 2. Для заполнения пескодувного резервуара стержневой смесью автомат имеет питатель 1. Вибратор 14 служит для транспортировки стержневой смеси из лотка питателя в пескодувный резервуар с насадкой 6. Чтобы стержневая смесь в период заполнения стержневого ящика не высыпалась через верхний край пескодув-

ного резервуара, применяется шибер 5, закрывающий резервуар.

Непосредственное формирование стержней происходит в стержневых ящиках 7, закрепленных на поворотном столе 8. Данная машина имеет два стержневых ящика с горизонтальным разъемом, нагреваемых электронагревателями, расположенными в ящиках. Поворотный стол машины служит для передвижения стержневых ящиков с позиции наддува на позицию разборки и обратно. Для прижима стержневого ящика к пескодувному резервуару служит стол прижима 9. Для разборки стержневого ящика служат механизм разборки 11 и стол протяжки 10. Стержень, извлеченный из стержневого ящика, забирается поворотной стрелой 12. Исполнительные механизмы – пневмоцилиндры 15 – 22, датчиками положения служат конечные выключатели 23. Чтобы подать машине команду на пуск или на остановку, используется пульт управления 13. Элемент релейно-контактной схемы управления, полученной реализацией логического синтеза системы управления [36], приведена на рис. 10. Подробное описание элементов схемы можно найти в работе [37].

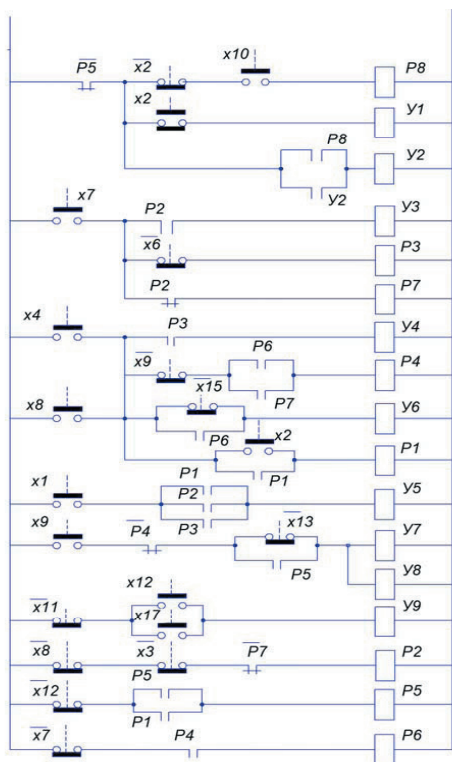


Рис. 10. Элемент релейно-контактной схемы управления двухпозиционным стержневым карусельным автоматом

Схема регулятора температуры стержневого ящика по заданной программе в автомате может состоять из измерительной части, трехкаскадного усилителя низкой частоты, фазочувствительного каскада с выходным реле, выпрямителя со стабилизатором напряжения и синхронного двигателя с механизмом задания программы.

Измерительная часть схемы регулятора состоит из двух мостов: измерительного 1 и регулирующего 2 (рис. 11).

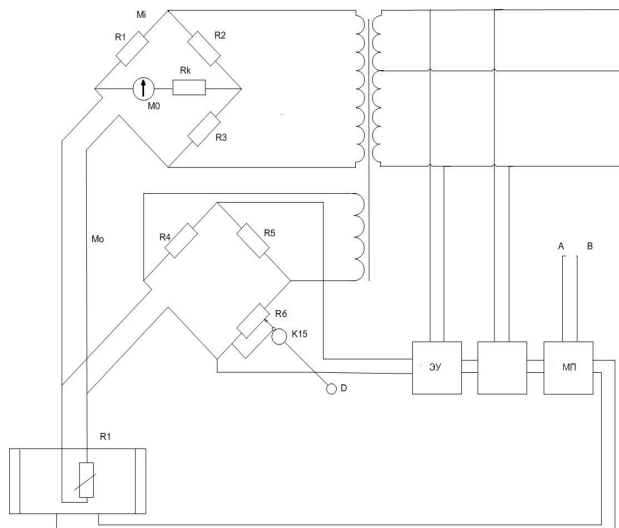


Рис. 11. Измерительная часть схемы регулятора

Измерительный мост, в диагональ которого включен микроамперметр, образован сопротивлениями R_1, R_2, R_3, R_4 . Термосопротивление R_k служит для компенсации изменения сопротивления рамки микроамперметра при прогреве регулятора. Регулирующий мост состоит из сопротивлений R_4, R_5, R_6, R_t . В одно из плеч обоих мостов входит термометр сопротивления R_t , являющийся датчиком температуры. Питание моста осуществляется переменным напряжением от обмотки силового трансформатора. Программное задание температуры осуществляется реостатным задатчиком R_6 , движок которого кинематически связан с роликом, перемещающимся по копиру К. Профиль копира соответствует определенной программе изменения температуры.

Работа регулятора происходит по следующей схеме: изменение сопротивления датчика R_t или задатчика R_6 вызывает разбаланс моста, напряжение разбаланса усиливается в усилителе и поступает на электромагнитное реле, которое срабатывает и своими контактами замыкает цепь исполнительного механизма, который в свою очередь включает или выключает цепь (соответственно при уменьшении или увеличении температуры регулируемого объекта).

Математическую модель объекта управления можно записать в виде

$$\frac{dQ}{dt} = I^2 R, \tag{13}$$

где $R=f(\Delta x)$ – сопротивление, зависящее от положения бегунка реохорда, I – сила тока, Q – количество тепла, выделяющегося в оснастке при нагревании.

Введя обозначения $x_1=Q$ и $x_2=R$, и учитывая, что $Q=C_m(T_2-T_1)=C_m\Delta T$ (здесь C_m – теплоемкость сплава, из которого изготовлен стержневой ящик, T – температура нагрева ящика), модель принимает вид

$$\begin{cases} \frac{dx_1}{dt} = k_1 x_2, \\ \frac{dx_2}{dt} = u, \end{cases} \tag{14}$$

где u – управление, а изменение температуры нагревателя пропорционально величине сопротивления в цепи нагревателя оснастки.

Сравнивая СДР (14) и СДР (12), можно увидеть идентичность их структуры.

4. 3. Математическое моделирование температурного режима термовременной обработки в электропечи-миксере

Температура ванны электродуговой печи после выпуска определенной порции расплава в ковш начинает быстро снижаться, что связано с уменьшением объема ванны – скорость охлаждения тем больше, чем меньше объем ванны и, следовательно, её глубина. Для восстановления заданного температурного режима печь включается на подогрев, и расплав опять перегревается до заданной температуры. Однако КПД электродуговой печи в период перегрева и доводки не превышает 25 %, так как большая часть тепла дуг рассеивается по всему внутреннему пространству печи. Так как к моменту поступления новой заявки на расплав, генерируемой конвейером, качество расплава должно соответствовать заданному, возникает необходимость синтеза оптимального регулятора температуры, который обеспечивал бы перевод системы из фактического начального состояния в конечное состояние за минимальное время. При этом начальное состояние оценивается вектор-функцией $F_i(t)$ – суть содержание элементов химического состава сплава в момент времени, соответствующий возврату печи в исходное положение после выпуска расплава (т. е. в момент времени, когда объем ванны уменьшился), а конечное состояние оценивается параметрами вектор-функции $\{F_i^a\}$ – суть заданный в конкретном процессе химический состав сплава. Связь этих значений с температурой задается уравнением вида

$$F_i(t) = A_0 e^{A_1 e^{\frac{E_i^a}{R_{x1}(t)} \frac{S_i}{m}}}, \tag{15}$$

где A_0 – параметр интегрирования кинетического уравнения $F_i = \varphi(t)$, A_1 – параметр уравнения Аррениуса, E_i^a – энергия активации химической реакции, в которой принимает участие компонент химического состава сплава F_i , x_1 – температура ванны, S – площадь реакционной поверхности в системе, в которой протекают химические реакции с участием компонента F_i , m – масса расплава в печи (загрузка печи).

Формализация описания объекта управления – температурного режима ванны – может быть выполнена из следующих соображений. Отбор из печи некоторого количества расплава приводит к увеличению количества тепла Q_2 , отдаваемого ванной. Задачей управления является поддержание заданного значения температуры T_0 при возможных изменениях потерь тепла ванной Q_2 . Приход тепла в ванну Q_1 осуществляется от электрических дуг при включенном на выбранной ступени напряжения трансформаторе. Регулирование осуществляется изменением величины Q_1 , определяемой напряжением U выбранной ступени напряжения трансформатора, переключение ступени напряжения осуществляется электроприводом D . Для переключения напряжения могут быть использованы автоматические регуляторы напряжения (АРНТ), осуществляющие автоматическое управ-

ление электроприводами переключателя отпаек на обмотках силового трансформатора регулятора переключения напряжения импульсным сигналом, длительность которого определяется временем запуска электропривода. Структурная схема такого устройства, представленная на рис. 12, содержит три основных функциональных звена: тракт регулирования с двумя каналами управления («Убавить» – на понижение напряжения, «Прибавить» – на повышение напряжения), блок управления и контроля (БУК), генератор тактовых импульсов с элементом изменения периода следования тактовых импульсов [38].

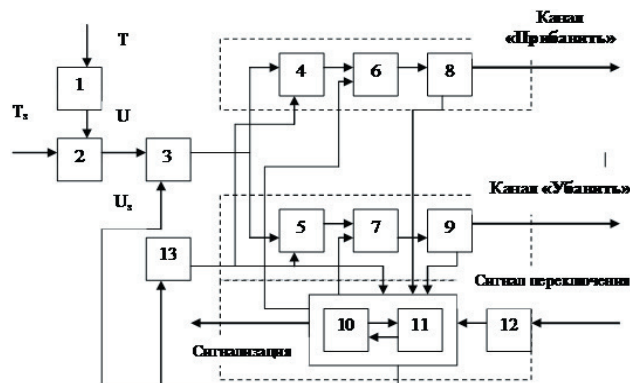


Рис. 12. Структурная схема автоматического регулятора напряжения, устанавливаемого на трансформаторах

В состав тракта регулирования входят следующие элементы: сумматор 2, датчик температуры 1, элементы формирования и изменения зоны нечувствительности и уставки АРНТ, измерения и разделения каналов с преобразователями 5, элементы времени 4 и 5, элементы запрета 6 и 7, исполнительные элементы 8 и 9. Контролируемая температура (напряжение заданное) вырабатывается в сумматоре 2; фактическая температура (напряжение фактическое) суммируется с напряжением от датчика температуры 1. Элемент 3 обеспечивает преобразование сигналов, поступающих от сумматора, формирование зоны нечувствительности, изменение уставки АРНТ и выдачу сигналов на элементы времени 4 и 5. Уставка регулятора по напряжению регулируется ступенями в режимах «грубо» и «точно». В цепи каждого из исполнительных элементов 8 и 9, отрабатывающих команды «Убавить» и «Прибавить», включены соответственно элементы запрета 6 и 7. Действие АРНТ прекращается элементами запрета при достижении приводными механизмами конечных положений, а также при неисправностях электроприводов и элементов схемы регулятора.

Управляющие команды на элементы запрета подаются от БУК, в состав которого входят три элемента: исправности регулятора 10, исправности электропривода 11 и фиксации сигнала «Переключение» электропривода 12. Одновременно с командами на запрет действия АРНТ БУК дает сигнал о наличии неисправности. Исправность электропривода контролируется по результату выполнения команды управления («Пошел» или «Не пошел») и по времени («Закончил» или «Застрял»). Блок управления и контроля управляет также измерительным органом 3 и генератором тактовых импульсов 13.

Результатом решения задачи поиска оптимального управления является определение закона изменения $U(t)$, при котором любое отклонение температуры ванны, вызываемые изменением её объема или выдержкой при выключенном трансформаторе, устраняется за минимальное время. Дифференциальное уравнение, описывающее изменение температуры ванны, вызванное изменением её объема, с учетом описанной постановки задачи, может быть представлено в виде

$$C_m \frac{dT}{dt} = Q_1 - Q_2, \tag{16}$$

где C_m – теплоёмкость ванны, Q_1 – тепло, подводимое к ванне от электрических дуг, Q_2 – тепло, отдаваемое ванной вследствие уменьшения её объема.

Так как тепло, подводимое к ванне от электрических дуг, пропорционально напряжению трансформатора, уравнение, описывающее закон изменения величины Q_1 в зависимости от напряжения трансформатора, имеет вид

$$\frac{dQ_1}{dt} = kU, \tag{17}$$

где k – коэффициент, учитывающий совокупное влияние характеристик трансформатора и привода механизма переключения ступеней напряжения трансформатора.

Величина напряжения U ограничена

$$-U_0 \leq U \leq U_0. \tag{18}$$

Переменные объекта управления в стационарном режиме связаны следующим образом:

$$T = T_0, \Delta Q_1 = \Delta Q_2. \tag{19}$$

В качестве характеристики температурного режима ванны можно принять величину отклонения температуры ванны от заданного значения: $\Delta T = T - T_0$. Тогда для стационарного состояния, т. е. интервала времени выдержки расплава в печи массой m до выдачи очередной его порции на конвейер в соответствии с технологической схемой термовременной обработки, справедливо соотношение

$$\Delta T = 0. \tag{20}$$

С учетом описанных выше рассуждений, целесообразно ввести новые переменные:

$$x_1 = \Delta Q_1, x_2 = C_m \Delta T, q = \Delta Q_2, u = kU. \tag{21}$$

Тогда система уравнений (16) – (17) может быть переписана в виде:

$$\begin{cases} \frac{dx_1}{dt} = u, \\ \frac{dx_2}{dt} = x_1 - q. \end{cases} \tag{22}$$

Сравнение полученной СДР, описывающей процесс изменения температурного режима ванны, в виде (22)

с СДР в видах (14) и (12), демонстрирует их идентичность.

Это позволяет сделать вывод о возможности получения типового математического описания для разных в смысле технологии, но идентичных в смысле регулирования «типовых» технологических параметров процессов.

5. Практическая реализация процедуры синтеза оптимального регулятора «типовых» технологических параметров

Подробное описание процедуры синтеза оптимального регулятора на примере регулирования температурного режима ванны в электродуговой печи, работающей в системе «печь – литейный конвейер», может быть найдена в работе [39].

При использовании «типового» математического описания в виде (22) для синтеза оптимального регулятора целесообразно воспользоваться принципом максимума Понтрягина [40] и сформулировать задачу следующим образом: для процесса, описываемого системой уравнений (22) при наличии ограничений на управление (18) найти закон изменения $u(t)$, при использовании которого процесс перейдет из произвольного начального состояния:

$$x_1(0) = x_1^{(0)}, x_2(0) = x_2^{(0)} \tag{23}$$

в конечное состояние:

$$x_1(\tau_k) = q, x_2(\tau_k) = 0 \tag{24}$$

за минимальное время τ_k .

Уравнение траектории процесса в координатах « $x_1 - x_2$ », получаемое реализацией принципа максимума Понтрягина, имеет вид

$$x_2 = \frac{1}{2u}(x_1 - q)^2 + C - \frac{q^2}{2u}, \tag{25}$$

где постоянная интегрирования C может быть найдена из условия, что траектория, описываемая уравнением (25), проходит через заданную точку $(x_1^{(0)}, x_2^{(0)})$ фазовой плоскости

$$C = x_2^{(0)} - \frac{1}{2u}(x_1^{(0)} - q)^2 + \frac{q^2}{2u}. \tag{26}$$

Подстановка (26) в (25) даёт

$$x_2 = \frac{1}{2u}(x_1 - q)^2 + x_2^{(0)} - \frac{1}{2u}(x_1^{(0)} - q)^2, \tag{27}$$

где второе и третье слагаемые задают постоянную C_0 , позволяющую определить траекторию, по которой можно попасть в конечное состояние

$$C_0 = x_2^{(0)} - \frac{1}{2u}(x_1^{(0)} - q)^2. \tag{28}$$

Уравнение (27) описывает на фазовой плоскости траекторию, проходящую через произвольную точку

с координатами $(x_1^{(0)}, x_2^{(0)})$, в том числе и траекторию, проходящую через конечную точку, координаты которой заданы условиями (24). Следовательно, уравнение траектории, по которой можно попасть в конечное состояние, может быть получено подстановкой (24) в (28):

$$x_2 = \frac{1}{2u}(x_1 - q)^2. \tag{29}$$

Таким образом, уравнение (29) описывает совокупность точек фазовой плоскости, из которых переход в конечное состояние (24) возможен при использовании постоянного управления.

Если $u = u_0$, то уравнение (29) имеет вид

$$x_2 = \frac{1}{2u_0}(x_1 - q)^2, \tag{30}$$

если $u = -u_0$, то уравнение (29) имеет вид

$$x_2 = -\frac{1}{2u_0}(x_1 - q)^2. \tag{31}$$

Вид траектории при положительном и отрицательном управлении показан на рис. 13.

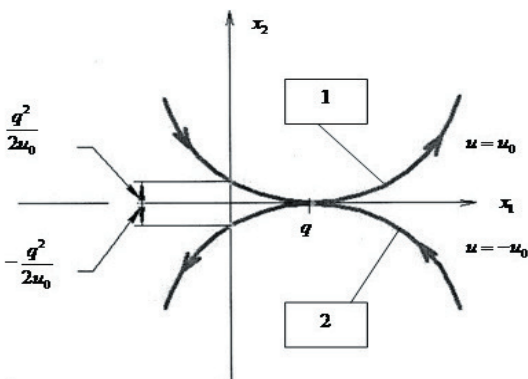


Рис. 13. Вид траектории при положительном (1) и отрицательном (2) управлении

Общее уравнение, описывающее геометрическое место точек переключения оптимального управления, имеет вид

$$x_2 = \frac{1}{2u_0}(x_1 - q)^2 \operatorname{sgn}(q - x_1). \tag{32}$$

Оптимальное управление в аналитической форме, таким образом, может быть представлено следующим образом:

$$u_{\text{опт}} = u_0 \operatorname{sgn} \left[\frac{1}{2u_0}(x_1 - q)^2 \operatorname{sgn}(q - x_1) - x_2 \right]. \tag{33}$$

Уравнение для определения момента переключения τ_s и общего времени переходного процесса τ_k имеют вид (34) и (35) соответственно:

$$\tau_s = \frac{x_1^{(0)} - q}{u_0} \operatorname{sgn} \left[x_2^{(0)} - \frac{(x_1^{(0)} - q)^2}{2u_0} \operatorname{sgn}(q - x_1^{(0)}) \right] + \sqrt{\frac{1}{u_0} \left| x_2^{(0)} + \frac{1}{2}(x_1^{(0)} - q) \left[\frac{x_1^{(0)} - q}{u_0} \operatorname{sgn} \left[x_2^{(0)} - \frac{(x_1^{(0)} - q)^2}{2u_0} \operatorname{sgn}(q - x_1^{(0)}) \right] \right] \right|}. \tag{34}$$

$$\tau_k = \frac{x_1^{(0)} - q}{u_0} \operatorname{sgn} \left[x_2^{(0)} - \frac{(x_1^{(0)} - q)^2}{2u_0} \operatorname{sgn}(q - x_1^{(0)}) \right] + 2 \sqrt{\frac{1}{u_0} \left| x_2^{(0)} + \frac{1}{2}(x_1^{(0)} - q) \left[\frac{x_1^{(0)} - q}{u_0} \operatorname{sgn} \left[x_2^{(0)} - \frac{(x_1^{(0)} - q)^2}{2u_0} \operatorname{sgn}(q - x_1^{(0)}) \right] \right] \right|}. \tag{35}$$

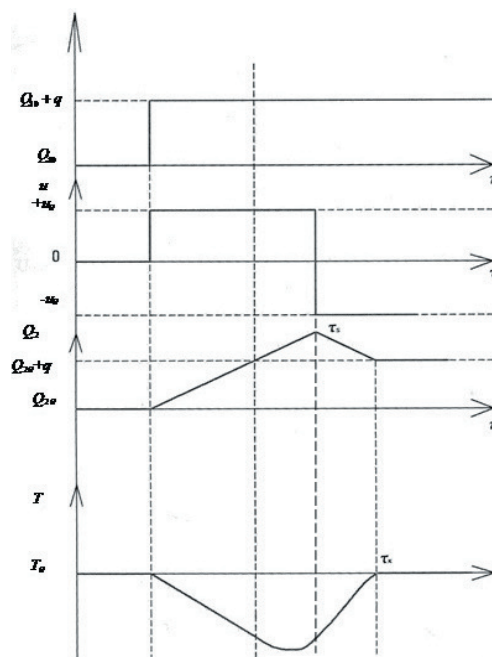


Рис. 14. График изменения параметров в процессе регулирования во времени

Полученные решения совпадают с решениями для задачи, известной как задача о синтезе оптимального регулятора уровня, приведенной в работе [41].

Как следует из приведенных результатов, описанная процедура синтеза регулятора позволяет получать оптимальные в смысле быстродействия переходные процессы в объекте регулирования, причем подобная процедура может быть выполнена на основании «типового» математического описания разных в смысле технологии, но идентичных в смысле регулирования «типовых» технологических параметров процессов.

6. Выводы

Среди наиболее существенных технологических параметров, влияющих на управляемые процессы изготовления стержней в нагреваемой оснастке, процессы смесераздачи и процессы термовременной обра-

ботки, являются соответственно температура нагрева оснастки, уровень компонентов формовочной/стержневой смеси или самой формовочной/стержневой смеси, температура ванны в электропечи.

Типовое математическое описание для различных процессов литейного производства: смесераздачи, изготовления стержней в нагреваемой оснастке, термовременной обработки в электропечи-миксере, представляет собой достаточно простую систему дифференциальных уравнений, которые могут быть

использованы для синтеза оптимального регулятора «типовых» технологических параметров.

Использование «типизации» в получении математического описания различных технологических процессов литейного производства позволяет решать задачу синтеза оптимальных регуляторов технологических параметров на основе использования принципа максимума Понтрягина и получать оптимальные в смысле быстродействия переходные процессы в объекте регулирования.

Литература

1. Seraya, O. V. Linear regression analysis of a small sample of fuzzy input data [Text] / O. V. Seraya, D. A. Demin // Journal of Automation and Information Sciences. – 2012. – № 44 (7). – P. 34–48.
2. Дёмин, Д. А. Ресурсосберегающие технологии в литейном производстве [Текст]: сп. пособие / Д. А. Дёмин, Е. Б. Дёмина, О. В. Акимов и др.; под общ. ред. Д. А. Дёмина. – 1 изд. – Х.: Технологический Центр, 2012. – 320 с.
3. Машины для изготовления песчаных стержней в нагреваемой оснастке [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://spectechsnab.ru>. – Загл. с экрана.
4. Фанталов, Л. И. Основы проектирования литейных цехов и заводов [Текст] : уч. для вузов по специальностям «Машины и технология литейного производства» и «Литейное производство чёрных и цветных металлов» / Л. И. Фанталов, Б. В. Кнорре, С. И. Четвертухин и др.; под ред. Б. В. Кнорре. – 2-е изд., перераб. – М.: Машиностроение, 1979. – 376 с.
5. Термоотверждаемые системы [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.huettenes-albertus.ru>. – Загл. с экрана.
6. Пескострельные стержневые автоматы [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.guss-ex.com>. – Загл. с экрана.
7. Стержневые автоматы [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.bellitmarsh.by>. – Загл. с экрана.
8. Стержневые автоматы для изготовления стержней с температурным отверждением [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.laempe.com>. – Загл. с экрана.
9. Изготовление стержней с температурным отверждением [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.belniilit.by>. – Загл. с экрана.
10. Боголепов, Е. Д. Моделирование прочности стержневых смесей, отверждаемых в нагреваемой оснастке с целью интенсификации использования свойств и экономии связующего, повышающего качество отливок и экологичность процесса [Текст] : автор. дис. ... канд. техн. наук / Е. Д. Боголепов. – Москва, 1990.
11. Смесительное оборудование [Электронный ресурс]. – Режим доступа: www.eirich.ru. – Загл. с экрана.
12. Смесители [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.ruscastings.ru>. – Загл. с экрана.
13. Труфанов, И. Д. Общетеоретические аспекты разработки стохастической системы автоматизированной экспертной оценки динамического качества производственных ситуаций электросталеплавления [Текст] / И. Д. Труфанов, К. И. Чумаков, А. А. Бондаренко // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2005. – № 6/2 (18). – С. 52–58.
14. Ивахненко, А. Г. Предсказание случайных процессов [Текст] / А. Г. Ивахненко, В. Г. Лапа. – Киев: Наукова думка, 1971. – 400 с.
15. Ивахненко, А. Г. Самоорганизация прогнозирующих моделей [Текст] / А. Г. Ивахненко, И. А. Мюллер. – Киев: Техника, 1985. – 290 с.
16. Зада, Л. Теория линейных систем [Текст] / Л. Зада, Ч. Дезоэр. – М.: Наука, 1970. – 703 с.
17. Рей, У. Методы управления технологическими объектами [Текст] / У. Рей. – М.: Мир, 1983. – 368 с.
18. Данциг, Дж. Линейное программирование, его обобщение и применение [Текст] / Дж. Данциг. – М.: Прогресс, 1976. – 600 с.
19. Федоренко, Р. П. Приближенное решение задач оптимального управления [Текст] / Р. П. Федоренко. – М.: Наука, 1978. – 488 с.
20. Труфанов, И. Д. Математическое моделирование и опытно-экспериментальное исследование энергоэффективности электротехнологического комплекса мощной дуговой сталеплавильной печи [Текст] / И. Д. Труфанов, К. И. Чумаков, А. И. Любый // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2007. – № 4/1 (28). – С. 64–69.
21. Труфанов, И. Д. Энергосберегающее управление электротехнологическим комплексом как база повышения энергоэффективности металлургии стали [Текст] / И. Д. Труфанов, В. П. Метельский, К. И. Чумаков, О. Ю. Лозинский, Я. С. Паранчук // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2008. – № 6/1 (36). – С. 22–29.
22. Михалевич, В. С. Методы последовательной оптимизации [Текст] / В. С. Михалевич, А. И. Кукса. – М., 1983. – 208 с.
23. Ванько, В. И. Вариационное исчисление и оптимальное управление [Текст] / В. И. Ванько, О. В. Ермошина, Г. Н. Кувыркин; под ред. В. С. Зарубина, А. П. Крищенко. – М.: Изд. МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2001. – 488 с.
24. Колмогоров, А. Н. Элементы теории функций и функционального анализа [Текст] / А. Н. Колмогоров, С. В. Фомин. – М.: Наука, 1989. – 632 с.

25. Зарубин, В. С. Вариационные численные методы механики сплошной среды [Текст] / В. С. Зарубин, С. С. Селиванов. – М.: Изд. МГТУ им. Н. Э. Баумана, 1993. – 358 с.
26. Труфанов, И. Д. Научные основы разрешения инновационных проблем идентификации в системах автоматизации процессов электрометаллургии стали и сплавов [Текст] / И. Д. Труфанов, А. П. Лютый, К. И. Чумаков, И. А. Андрияс, Т. И. Казанская, В. В. Джиоев // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2010. – № 3/10 (45). – С. 8–23.
27. Разживин, А. В. Информационное обеспечение системы автоматического управления дуговой сталеплавильной печью по температуре металла [Текст] / А. В. Разживин, И. М. Сагайда // Вісник СУДУ. – 2000. – № 3(25). – С. 215–220.
28. Разживин, А. В. Моделирование мощности и напряжения на электрической дуге [Текст] / А. В. Разживин, А. А. Сердюк // Наукові праці ДонНТУ, 2003. – № 64.
29. Игнатов, И. И. Расчет электрических параметров и режимов дуговых сталеплавильных печей [Текст] / И. И. Игнатов, А. В. Хаинсон. – Электричество, 1983. – № 8.
30. Hidehari, Shibaïke Long-term high-efficiency operation of Sakai No 2 blast furnace (third campaign) [Text] / Shibaïke Hidehari, Sasaki Shin // Nippon Techn. Rept. – 1998. – № 43.
31. Игнатов, И. И. Математическое моделирование электрических режимов дуговых сталеплавильных печей [Текст] / И. И. Игнатов, А. В. Хаинсон. – Электричество, 1985. – № 8.
32. Питгарц, Д. А. Автоматизация плавильных электропечей с применением микро-ЭВМ [Текст] / Д. А. Питгарц // Б-ка электро-термиста. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – Вып. 73. – 136 с.
33. Дёмин, Д. А. Оптимизация режима работы дуговой электропечи при плавке легированного чугуна [Текст] / Д. А. Дёмин // Восточно-европейский журнал передовых технологий. – 2004. – № 6(12). – С. 43–46.
34. Дёмин, Д. А. Совершенствование процессов управления электроплавкой [Текст] / Д. А. Дёмин // Вісник національного технічного університету «ХПІ». – 2010. – № 4. – С. 33–44.
35. Дёмин, Д. А. Методология формирования функционала для задачи оптимального управления электроплавкой [Текст] / Д. А. Дёмин // Технологический аудит и резервы производства. – 2011. – № 1. – С. 15–24.
36. Дёмин, Д. А. Синтез системы управления импульсным формообразованием в процессе модернизации встряхивающе-прессовой формочной машины [Текст] / Д. А. Дёмин // Вісник національного технічного університету «ХПІ». – 2013. – № 70. – С. 105–114.
37. Сиротенко, В. А. Синтез системы управления двухпозиционным стержневым автоматом для изготовления стержней в нагреваемой оснастке [Текст] / В. А. Сиротенко // Вісник національного технічного університету «ХПІ». – 2013. – № 70. – С. 114–122.
38. Автоматический регулятор напряжения трансформаторов [Электронный ресурс]. – Режим доступа: www.sc-books.ru/book_aes.php?id=35. – Загл. с экрана.
39. Demin, D. A. Synthesis of optimal temperature regulator of electroarc holding furnace bath [Text] / D. A. Demin // Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu. – 2012. – № 6. – P. 52–58.
40. Понтрягин, Л. С. Математическая теория оптимальных процессов [Текст] / Л. С. Понтрягин, В. Г. Болтянский и др. – М.: Физматгиз, 1961.
41. Бояринов, А. И. Методы оптимизации в химической технологии [Текст] / А. И. Бояринов, В. В. Кафаров. – М.: Химия, 1975. – 576 с.