

## МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ МНОГОСВЯЗНЫХ ОБЪЕКТОВ УПРАВЛЕНИЯ

**М. Н. М. Саиф, В. Г. Матвейкин,  
Б. С. Дмитриевский, А. В. Башкатова, А. А. Мамонтов**

*Кафедра «Информационные процессы и управление»,  
ФГБОУ ВО «ТГТУ», г. Тамбов, Россия; dmiboris@yandex.ru*

**Ключевые слова:** математическая модель; объект управления; система управления; сталеплавильная печь; управляющее воздействие; сушильная установка.

**Аннотация:** Рассмотрены теоретические и методологические основы построения математических моделей многосвязных объектов управления. Составление математической модели проведено на основе имеющихся представлений о конкретном виде качественных зависимостей между переменными объекта; учтены условия, которые должны соблюдаться при решении задачи управления. Результаты изучения представлены графически в виде структурной схемы при формализации задачи. Математическая модель сформулирована с учетом выявленной структуры объекта. В качестве примеров рассмотрены процессы сушки дисперсий и процессы плавления в дуговой сталеплавильной печи.

---

### Введение

Объектом системы управления нижнего уровня является отдельный агрегат технологической схемы или группа взаимосвязанных агрегатов, представляющих собой единую технологическую установку [1 – 6]. В связи с многообразием объектов для местных систем управления характерно разнообразие задач управления, методов управления и технических средств реализации алгоритмов управления.

Одна из наиболее характерных особенностей системы управления нижнего уровня заключается в том, что модели объектов управления, используемые при создании местных систем, могут существенно отличаться от используемых на высших ступенях иерархии. При этом модели объектов управления в местных системах, как правило, характеризуются более глубоким проникновением в механизм исследуемых процессов и служат основой для разработки автоматизированной системы управления.

### Теоретический анализ

Процессы, происходящие в технологических агрегатах, представляют собой сложное переплетение физико-химических, тепломассообменных и других процессов, что, с одной стороны, дает возможность одновременного исследования целого класса различных, но однотипных аппаратов, с другой, – приводит к сложным математическим зависимостям.

Математические модели агрегатов могут иметь вид дифференциальных уравнений в частных производных, обыкновенных дифференциальных уравнений, нелинейных и линейных алгебраических соотношений. Модели объектов местных систем, как правило, более сложные по структуре, но имеют меньшую размерность, чем модели объектов верхнего уровня управления.

Разнообразие объектов управления вызывает, в свою очередь, многообразие критериев управления. Если на высших ступенях управления критерии эффективности, как правило, однотипны и носят экономический характер (прибыль, производительность, себестоимость), то на нижнем уровне управления данный критерий чаще является техническим.

Условия, которые должны соблюдаться при решении задачи управления, определяются, с одной стороны, ограниченными возможностями объекта (например, предельная производительность, максимальная допустимая температура, давление и т.д.), с другой, – связями данного агрегата с другими участками производства. Ограничения, зависящие от последних, на нижнем уровне управления определяются либо технологическим регламентом, либо высшей ступенью управления. Своеобразие моделей объектов и специфика задач управления накладывают отпечаток и на выбор математических методов для их решения.

Системы нижнего уровня характеризуются более непосредственной связью с объектом. В большинстве случаев информация вводится в систему управления от датчиков автоматически, управляющие воздействия могут поступать непосредственно на регулирующие клапаны. В системах управления высшего уровня, напротив, связь с объектом практически осуществляется, в основном, через человека. В системах управления нижнего уровня сбор информации и выдача управляющих воздействий обычно проводятся с большей частотой, чем на верхних ступенях иерархии.

Вследствие многообразия форм связи с объектом технические средства, применяемые на нижней ступени управления, значительно более разнообразны и многочисленны, чем средства, используемые на верхних уровнях иерархии. Перечисленные особенности местных систем управления обуславливают специфику методики построения системы управления агрегатами и техническими процессами.

### **Методика построения системы управления техническими объектами**

При описании существующей структуры управляющей части системы предполагаем, что до автоматизации все основные задачи, связанные с управлением установкой, решаются только людьми, которых условно делят на две основные группы – технологов и операторов.

Первая разрабатывает технологические инструкции, которые помимо общих рекомендаций содержат инструктивные требования и оперативные указания к способам ведения и техническим показателям процесса. По мере накопления знаний об установке, а также изменений в ее конструкции и свойствах используемых материалов, способы управления устаревают и заменяются новыми.

Группа операторов принимает и реализует решения об управлении с учетом требований технических инструкций и полученных заданий по номенклатуре продукта, объему выпуска и т.д. Эти задания поступают в управляющую часть от вышестоящей ступени производственной иерархии.

При описании управляющей части необходимо перечислить всех штатных технологов и операторов, указать функции каждого из них и выделить информационные потоки, необходимые для выполнения этих функций. Функции операторов удобно связывать с соответствующими органами управления установкой. При таком подходе функции операторов сводятся к выбору состояния соответствующего органа управления в данный момент времени в зависимости от содержания соответствующего информационного потока.

Результаты изучения управляющей части удобно представить графически. На такой схеме информационные потоки будут исходить от вышестоящей производственной ступени и органов измерения установки, группироваться в соответствии с распределенными функциями между операторами и технологами и в форме принятых решений замыкаться на органах управления установкой.

При изучении существующей системы управления целесообразно обращать особое внимание на факторы, которые формируются вышестоящей иерархической ступенью для стимулирования тех или иных решений операторов и технологов установки. Совокупность этих факторов является неформализованным критерием для управляющей части системы и должна способствовать улучшению основных технико-экономических показателей участка производства, включающего рассматриваемую установку. Основными источниками информации о принятом порядке стимулирования служат некоторые положения технологических инструкций и действующая система премирования. Остальные средства воздействия на операторов носят субъективный характер и с большим трудом поддаются последующей формализации.

Отметим, что существующие системы стимулирования могут быть несовершенными и содержать противоречивые требования, которые необходимо проанализировать перед формулированием цели управления. Ограничения, действующие на установке, обычно удается зафиксировать без особых трудностей.

При начальном знакомстве с исследуемой установкой важно вскрыть причины потерь, связанные с недостатками существующих алгоритмов и системы управления. Такие недостатки обычно являются следствием ограниченных возможностей человека, которые проявляются при управлении сложными установками, быстротечными плохо наблюдаемыми технологическими процессами, при повышенных требованиях к качеству продукции и во многих аналогичных ситуациях. Возможны потери из-за неправильного распределения информационных потоков, отсутствия приборов для измерения важных переменных объекта, органов управления для измерения существенных характеристик каких-либо материальных или энергетических потоков установки и т.д. Знание всех этих причин сделает последующую работу по формализации задачи более целенаправленной и позволит априорно оценивать эффективность тех или иных решений.

Составление структурной схемы предшествует идентификации объекта: это некоторая первоначальная формализация априорных данных об объекте. Структурная схема обладает наглядностью, позволяющей представить объект управления в виде некоторой модели с причинно-следственной связью между переменными. Она позволяет провести структурную декомпозицию задачи, то есть разделить общую задачу управления на несколько более простых подзадач.

Структурная схема представляет собой условное графическое изображение объекта управления в виде ряда элементов, соединенных между собой и с окружающей системой однонаправленными связями. Эти связи символизируют переменные, характеризующие состояние объекта, называемые координатами.

Координаты являются переменными в уравнениях, описывающих объект (коэффициенты этих уравнений называют параметрами объекта). Элементы структурной схемы представляют собой определенные математические преобразования координат объекта в отличие от принципиальной схемы, элементами которой являются отдельные аппараты и агрегаты, а связи между ними и с окружающей средой представляют собой потоки энергии и материалов. При составлении структурной схемы стремятся к делению объекта на возможно более простые элементы, каждый из которых имел бы небольшое число координат.

Исходными данными для построения структурной схемы являются выделенные на этапе формулирования задачи управления управляющие воздействия, выходные координаты и наблюдаемые переменные. На структурной схеме изображаются также возмущающие воздействия и промежуточные координаты.

## Формирование математической модели процесса сушки

Сушка – сложный процесс тепломассообмена, вызывающий физико-химические превращения в высушиваемых материалах. Процесс сушки дисперсий – жидких текучих материалов (суспензий, паст, влажных осадков и т.п.) – широко применяется в процессах химической, пищевой, фармацевтической и других отраслях промышленности [7, 8]. Типичными примерами сушилок таких материалов являются распылительные сушилки с фонтанирующим и кипящим слоем и некоторые др. Параметры, необходимые для управления процессом сушки, могут быть разделены на три основные группы: энергетические, физико-химические, механические и геометрические.

К первой группе относятся (при подводе энергии с помощью теплоносителя) – температура, энтальпия, расход и его влагосодержание, характеризующие подачу и распределение тепловой энергии, а также теплотехнические параметры высушиваемого материала (например, температуры во всех необходимых точках). Ко второй – показатели качества готового продукта, характеризующие цвет, запах, консистенцию и т.п. Третью группу составляют показатели, определяющие гранулометрический состав материала, механическую прочность, правильность геометрической формы и соблюдение размера.

В настоящее время большинство параметров, охватываемых системами управления сушильных установок, относится к первой группе. В основном измеряются и регулируются температуры теплоносителя, высушиваемого материала, расход теплоносителя. Реже измеряется и регулируется расход высушиваемых материалов. К основному параметру процесса сушки относится влагосодержание. Измерение влагосодержания теплоносителя не вызывает затруднений, а влагосодержание материала требует применения специальных средств.

Для измерения показателей второй и третьей групп пока не существует достаточно надежных и точных способов непрерывного контроля, что препятствует их использованию в схемах автоматизации сушильных установок, поэтому часто используется температура материала или газов на выходе из установки.

В распылительных сушилках с фонтанирующим и кипящим слоем сушильным агентом часто служат топочные газы, разбавляемые вторичным воздухом до необходимой температуры. В настоящее время все шире начинают применяться комбинированные установки, предназначенные для совмещения в одном агрегате процессов сушки и грануляции, сушки и дегидратации, сушки и классификации и т.п. Данные типы сушилок являются объектами с взаимосвязанными параметрами. Наиболее сложным представляется случай, когда инерционности перекрестных и основных связей близки. При автоматизации таких сушилок обычно принимаются гипотезы идеального смешения материала и изотермичности.

Для аэрофонтанной сушилки непрерывного действия основной регулируемой величиной служит температура в фонтанирующем слое, аналогично температуре кипящего слоя в сушилках псевдооживленного слоя. Управляющим воздействием во многих схемах управления является изменение подачи тепла на подогрев теплоносителя. Однако выбор управляющих воздействий, – нетривиальный процесс, что объясняется наличием взаимосвязанных параметров.

Рассмотрим математическую модель, описывающую процесс сушки в аппаратах с фонтанирующим слоем. Сушилка представляет собой конический аппарат, внутрь которого засыпаются частицы влажного материала. Снизу подается горячий воздух со скоростью, при которой он пробивает слой и образует фонтан (струю). Влажные частицы вовлекаются в фонтан и при движении в нем подсушиваются. На верхнем участке фонтана скорость уменьшается, и частицы падают

сверху на слой. Так как аппарат имеет коническую форму, частицы вдоль стенок постепенно смещаются вниз, подхватываются струей и т.д.

Для вывода математической модели примем следующие допущения:

- в каждый момент времени частицы попадают в струю у ее основания с влажностью, равной влажности слоя, и находятся в ней одинаковое время;
- время нахождения частиц в струе намного меньше, чем в слое;
- влажность частиц в слое одинаковая;
- большая часть влаги испаряется в струе, а испарение в слое незначительно либо им вовсе можно пренебречь;
- равновесное влагосодержание близко к нулю.

При данных допущениях можно выделить в аппарате две зоны, отличающиеся по процессам, протекающим в них, – зоны слоя и струи, взаимодействие которых показано на рис. 1, здесь  $W_H, W_1, W_2$  – влагосодержание частицы начальное, в фонтане и слое соответственно;  $N_1, N_2, N_{01}, N_{02}, N_{\text{вых}}$  – число частиц, вовлекаемых в фонтан из слоя, в слое, подающихся в струю, подающихся в слой и выгружаемых соответственно;  $K_1, K_0$  – коэффициенты скорости сушки в фонтане и слое соответственно.

Опишем изменения влагосодержания в каждой зоне следующими уравнениями:

$$dW_1/dt = -K(N_1W_1 + N_{01}W_H)/(N_1 + N_{01}); \quad W_1(t) = W_2;$$

$$dW_2/dt = ((N_1 + N_{01})W_1 - (N_1 + N_{\text{вых}})W_2 + N_{02}W_H - K_0N_2W_2)/N_2; \quad W_2(0) = W_H.$$

На рисунке 2 представлены результаты моделирования для периодической сушки при  $N_1 = 350; N_2 = 125\,000; N_{01}, N_{02}, N_{\text{вых}} = 0; K_0 = 0,1; K_1 = 0,4; W_H = 0,8$ .

Рассмотренная математическая модель может быть использована для поиска оптимальных управляющих воздействий.

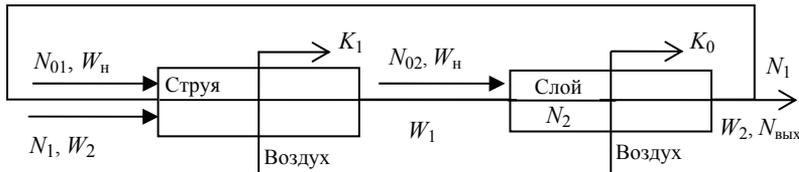


Рис. 1. Взаимодействие зон слоя и струи

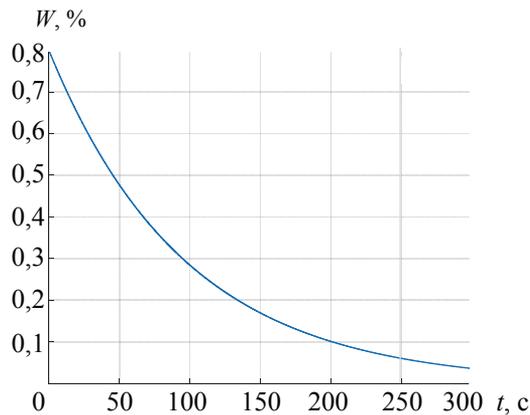


Рис. 2. Изменение влагосодержания частиц в слое  $W, \%$ , от времени  $t, с$

## Формирование математической модели процесса плавления в дуговой сталеплавильной печи

Типичная особенность горения дуг в дуговых сталеплавильных печах (ДСП) состоит в непрерывном изменении их формы, размеров и, соответственно, параметров электрического режима работы печи. Возникает задача рационального использования выделяемой мощности для нагрева и плавления материалов. Однако ее решение представляет большую сложность [9 – 11]. Для снижения энергопотребления, а также повышения качества производимой стали необходимо использование новейших систем управления.

Практика промышленного использования ДСП переменного тока показывает, что изменение электрического режима печи возможно двумя путями: изменениями длины дуги и вторичного напряжения.

Изменение вторичного напряжения трансформатора, подаваемого на печь, осуществляется периодически, в определенные моменты плавки, однако частые коммутации силовых цепей нежелательны. Длину дугового промежутка можно изменять оперативно.

Поскольку изменение длины дугового промежутка приводит к изменению силы тока и напряжения, то данные величины используются как параметры регулирования. Необходимо помнить, что напряжение, в свою очередь, зависит и от положения ступени печного трансформатора. При этом переключение ступеней реактора выделяют как дополнительное управляющее воздействие, которое широко применяется на современных дуговых печах. Переключение ступеней реактора позволяет вводить дополнительную индуктивность в подводящих цепях печи. Реактор входит в состав печного трансформатора, и с помощью переключения ступеней можно изменять его внешнюю характеристику. Это оказывает влияние на коэффициент мощности.

Рассматриваемая печь, как объект управления, может быть представлена следующей структурной схемой (рис. 3).

К переменным, характеризующим состояние процесса, относятся:

– к вектору регулируемых величин:  $I$  – сила тока дуги, А;  $U_{\phi}$  – напряжение фазы печи, В;

– вектору регулирующих воздействий:  $L$  – длина дуги, м;  $U_{\text{в}}$  – вторичное напряжение трансформатора, В;

– вектору возмущающих воздействий:  $A$  – обвал шихты (изменение геометрии поверхности под дугой);  $B$  – обгорание электродов (изменение геометрии поверхности над дугой);  $C$  – кипение металла (изменение геометрии поверхности под дугой);  $D, E$  – составы соответственно вводимых присадок и шихты (изменение электропроводности атмосферы в подэлектродной зоне).

Процесс выплавки стали включает в себя не только задачи по поддержанию горения дуги, но и другие служебные функции, обеспечивающие работу ДСП.

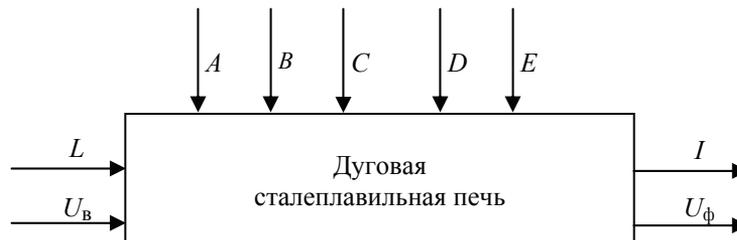


Рис. 3. Структурная схема дуговой сталеплавильной печи переменного тока

Выполнение требований эффективного управления процессом выплавки возможно только при наличии математической модели, описывающей процессы, происходящие в ДСП. Такая модель необходима для анализа влияния возмущающих и управляющих воздействий на выходные величины и способствует оперативному построению прогнозов поведения объекта при определенной стратегии управления.

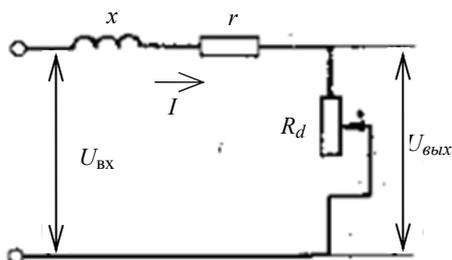


Рис. 4. «Рабочая» схема замещения электропечной установки

Для рассмотрения процесса воспользуемся схемой замещения электрической цепи однофазной дуги с соответствующими активными и индуктивными сопротивлениями. Наибольшую сложность использования схем замещения при моделировании представляет математическое описание поведения электрической дуги. Дуга представляется переменным активным сопротивлением. Данное допущение возможно и активно используется, однако такой подход не способен учесть нелинейные свойства дуги и предполагает наличие синусоидального тока, что вводит значительные погрешности. Приведем модели, учитывающие нелинейные свойства дуги и позволяющие отследить разные периоды горения дуги

$$\frac{dg_k}{dt} = \frac{1}{\Theta} \left( \frac{i_k^2}{U_k^2 g_k} - g_k \right), \quad (1)$$

где  $\Theta$  – «постоянная времени» проводимости дуги;  $i_k$  – мгновенное значение тока дуги, А;  $U_k$  – действующее значение напряжения на дуге, В;  $g_k$  – проводимость дуги.

Основываясь на вышеизложенном, схема замещения может быть преобразована к «рабочему» виду, представленному на рис. 4. Преобразованная «рабочая» схема в данном случае включает в себя сопротивления трансформатора  $x$  и короткой сети  $r$ ; ток дуги  $I$ ; входное  $U_{вх}$  и выходное  $U_{вых}$  напряжения; сопротивление дуги  $R_d$ , а также модель дуги (1).

Цель моделирования – выявление управляющих воздействий, обладающих наибольшим влиянием на состояние системы, и характерных зависимостей входных и выходных координат и формирование на основе их анализа технологических рекомендаций по ведению процесса. На рис. 5 изображены динамические характеристики для несинусоидальных кривых среднеквадратичных действующих значений тока.

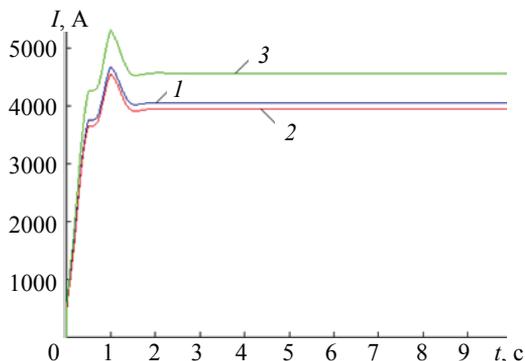


Рис. 5. Динамические характеристики горения дуги:

1 – номинальный режим; 2, 3 – при изменениях на 20 % длины дуги и вторичного напряжения соответственно

Анализ динамических характеристик показывает, что наибольшее отклонение от номинального режима произошло с изменением вторичного напряжения. Исходя из этого, в качестве управляющего воздействия можно выбрать изменение вторичного напряжения.

### Заключение

Разработан подход к построению математических моделей многосвязных объектов управления, состоящий в переходе от качественных зависимостей между переменными объекта к структурированной формализации задачи. На основе данной методики разработаны математические модели процессов сушки дисперсий и плавления в дуговой сталеплавильной печи. Модели позволяют проводить имитационные исследования, поддерживать основные параметры производственного процесса, обеспечивать управление производством по выбранным критериям и повышать его эффективность за счет своевременных управляющих воздействий.

### Список литературы

1. Битюков, В. К. Качественный анализ функционирования сетевой системы управления с конкурирующим методом доступа / В. К. Битюков, А. Е. Емельянов // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2012. – Т. 18, № 1. – С. 38 – 46.
2. Битюков, В. К. Обобщенная математическая модель сетевой системы управления с конкурирующим методом доступа / В. К. Битюков, А. Е. Емельянов // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2012. – Т. 18, № 2. – С. 319 – 326.
3. Дякин, В. Н. Динамическая модель управления развитием промышленного предприятия / В.Н. Дякин // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2013. – Т. 19, № 2. – С. 304 – 308.
4. Оневский, П. М. Автоматизация технологических процессов и производств / П. М. Оневский, В. А. Погонин, С. А. Скворцов. – Тамбов : Изд-во ФГБОУ ВПО «ТГТУ», 2012. – 216 с.
5. Технические средства автоматизации: программно-технические комплексы и контроллеры : учеб. пособие / И. А. Елизаров [и др.]. – М. : Машиностроение-1, 2004. – 180 с.
6. Парсункин, Б. П. Расчеты систем автоматической оптимизации управления технологическими процессами в металлургии / Б. Н. Парсункин, М. В. Бушманова, С. М. Андреев. – Магнитогорск : Изд-во МГТУ им. Г. И. Носова, 2003. – 267 с.
7. Пахомова, Ю. В. Особенности механизма и кинетики сушки капель дисперсий (на примере сушки послеспиртовой барды) / Ю. В. Пахомова, В. И. Коновалов, А. Н. Пахомов // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2011. – Т. 17, № 1. – С. 70 – 82.
8. Коновалов, В. И. Геометрия, циркуляция и тепломассоперенос при испарении капли на подложке / В. И. Коновалов, А. Н. Пахомов, Ю. В. Пахомова // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2011. – Т. 17, № 2. – С. 371 – 387.
9. Рябов, А. В. Современные способы выплавки стали в дуговых печах : учеб. пособие / А. В. Рябов, И. В. Чуманов, М. В. Шишимиров. – М. : Теплотехник, 2007. – 192 с.
10. Smolyarenko, V. D. Modern Status and Development of Eaf for Steelmaking / V. D. Smolyarenko, S. G. Ovchinnikov, B. P. Chernyakhovskij // Сталь. – 2005. – № 2. – С. 47 – 51.
11. Управление режимом плавки в дуговой электропечи переменного тока с целью защиты холодильников стен печи / М. Кнооп [и др.] // Черные металлы. – 1997. – № 7. – С. 8 – 13.

## Mathematical Models of Multiply-Connected Control Objects

M. N. M. Saif, V. G. Matveykin,  
B. S. Dmitrievsky, A. V. Bashkatova, A. A. Mamontov

*Department of Information Processes and Control,  
TSTU, Tambov, Russia; dmiboris@yandex.ru*

**Keywords:** mathematical model; control object; control system; steelmaking control furnace; drying installation.

**Abstract:** The article deals with the theoretical and methodological basis of the construction of mathematical models of multiply-connected control objects. The compilation of a mathematical model is made on the basis of the available ideas about the specific type of qualitative dependencies between object variables, taking into account the conditions that must be met when solving the control problem. The results of the study are presented graphically in the form of a structural scheme for the formalization of the problem. A mathematical model was formed taking into account the identified structure of the object. The processes of dispersion drying and melting processes in an electric arc furnace were considered as examples.

### References

1. Bityukov V.K., Yemel'yanov A.Ye. [Qualitative analysis of the functioning of a network management system with a competing access method], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2012, vol. 18, no. 1, pp. 38-46. (In Russ., abstract in Eng.)
2. Bityukov V.K., Yemel'yanov A.Ye. [A generalized mathematical model of a network control system with a competing access method], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2012, vol. 18, no. 2, pp. 319-326. (In Russ., abstract in Eng.)
3. Dyakin V.N. [Dynamic model of industrial enterprise development management], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2013, vol. 19, no. 2, pp. 304-308. (In Russ., abstract in Eng.)
4. Onevskiy P.M., Pogonin V.A., Skvortsov S.A. *Avtomatizatsiya tekhnologicheskikh protsessov i proizvodstv* [Automation of technological processes and production], Tambov: Izdatel'stvo FGBOU VPO "TGTU", 2012, 216 p. (In Russ.)
5. Yelizarov I.A., Martem'yanov Yu.F., Skhirtladze A.G., Frolov S.V. *Tekhnicheskiye sredstva avtomatizatsii: programmno-tekhnicheskiye komplekсы i kontrolyery: uchebn. posobiye* [Technical means of automation: software and hardware systems and controllers: training. manual], Moscow: Mashinostroyeniye-1, 2004, 180 p. (In Russ.)
6. Parsunkin B.P., Bushmanova M.V., Andreyev S.M. *Raschety sistem avtomaticheskoy optimizatsii upravle-niya tekhnologicheskimi protsessami v metallurgii* [Calculations of automatic optimization systems for controlling technological processes in metallurgy], Magnitogorsk: Izdatel'stvo MGTU im. G. I. Nosova, 2003, 267 p. (In Russ.)
7. Pakhomova Yu.V., Konovalov V.I., Pakhomov A.N. [Peculiarities of the mechanism and kinetics of drying dispersion droplets (by the example of post-alcohol bards drying)], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2011, vol. 17, no. 1, pp. 70-82. (In Russ., abstract in Eng.)

8. Konovalov V.I., Pakhomov A.N., Pakhomova Yu.V. [Geometry, circulation and heat and mass transfer during evaporation of a droplet on a substrate], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2011, vol. 17, no. 2, pp. 371-387. (In Russ., abstract in Eng.)

9. Ryabov A.V., Chumanov I.V., Shishimirov M.V. *Sovremennyye sposoby vyplavki stali v dugovykh pechakh: uchebn. posobiye* [Modern methods of steel smelting in arc furnaces: training. manual], Moscow: Teplotekhnika, 2007, 192 p. (In Russ.)

10. Smolyarenko V.D., Ovchinnikov S.G., Chernyakhovskij B.P. Modern Status and Development of Eaf for Steelmaking, *Stal'* [Steel], 2005, no. 2, pp. 47-51. (In Russ.)

11. Knoop M., Likhterbek R., Kele Z., Zing Yu. [Controlling the smelting mode in an AC electric arc furnace in order to protect the wall furnace refrigerators], *Chernyye metally* [Black metals], 1997, no. 7, pp. 8-13. (In Russ.)

---

## Mathematische Modelle von mehrfach verbundenen Steuerobjekten

**Zusammenfassung:** Der Artikel ist den theoretischen und methodologischen Grundlagen der Konstruktion der mathematischen Modelle der mehrfach verbundenen Steuerobjekte gewidmet. Die Erstellung eines mathematischen Modells erfolgt auf der Grundlage der vorhandenen Vorstellungen von der konkreten Art der qualitativen Abhängigkeiten zwischen Objektvariablen und berücksichtigt die Bedingungen, die bei der Lösung des Steuerungsproblems erfüllt sein müssen. Die Ergebnisse der Studie sind grafisch in Form eines Strukturschemas bei der Formalisierung der Aufgabe dargestellt. Das mathematische Modell wird unter Berücksichtigung der identifizierten Struktur des Objekts gebildet. In dem Artikel werden als Beispiele die Prozesse der Dispersionstrocknung und Schmelzprozesse in einem Elektrolichtbogenofen betrachtet.

---

## Modèles mathématiques des objets à multiples liens de la commande

**Résumé:** L'article traite des bases de la construction théorique et méthodologique des modèles mathématiques des objets de contrôle multidirectionnels. La rédaction d'un modèle mathématique est faite à la base des représentations concernant le type concret des dépendances entre les variantes des objets en tenant compte des conditions qui doivent être respectées lors de la résolution de la tâche de la commande. Les résultats de l'étude sont présentés graphiquement sous la forme d'un schéma structurel lors de la formalisation d'une tâche. Le modèle mathématique est formé compte tenu de la structure de l'objet. L'article décrit les processus de séchage des dispersions et les processus de fusion dans le four à arc-en-fusion.

---

**Авторы:** *Саиф Марван Номан Мохаммед* – аспирант кафедры «Информационные процессы и управление»; *Матвейкин Валерий Григорьевич* – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Информационные процессы и управление»; *Дмитриевский Борис Сергеевич* – доктор технических наук, доцент, профессор кафедры «Информационные процессы и управление»; *Баикатова Александра Владимировна* – аспирант кафедры «Информационные процессы и управление»; *Мамонтов Андрей Александрович* – магистрант, ФГБОУ ВО «ТГТУ», г. Тамбов, Россия.

**Рецензент:** *Погонин Василий Александрович* – доктор технических наук, профессор кафедры «Информационные процессы и управление», ФГБОУ ВО «ТГТУ», г. Тамбов, Россия.