# Введение

Многоступенчатый процесс создания продукта является особенностью сложных производств. Каждый этап влияет на определенные параметры сырья и накладывает отпечаток на итоговые показатели качества, и очень важно рассматривать все факторы в совокупности. Поскольку ЭВМ позволяют отслеживать все происходящие измерения и накапливать показания, появляется возможность принципиального перехода от подбора подходящих зависимостей к этапу построения самонастраивающихся систем управления технологическим процессом производства с обратной связью по отклонению [1].

Цель разрабатываемой системы - усиление контроля качества изготавливаемой продукции путем анализа всего технологического маршрута и оценки взаимного влияния производственных переделов друг на друга.

# 1 Литературный и патентный обзор постановки подобных задач. Анализ аналогичных систем

## 1.1 Постановка подобных задач

Производство часто ориентируется на конкретные заказы, которые строго регламентируют требуемые показатели качества конечного продукта и его главные параметры. Ввиду этого, а также ввиду изменчивости качества исходного сырья, внесение изменений в технологический процесс или выходные характеристики готового продукта является неизбежным. Появляется необходимость корректировки диапазонов разрешенных значений, требуется осуществление идентификации технологии [1].

На первом этапе необходимо произвести моделирование технологического процесса, который заключается в сборе необходимой информации об этом процессе, ее анализе и статистической обработке. На данном этапе решается задача построения регрессионных моделей [2, 3]. Следует учесть, что очень часто связь технологических факторов с выходными характеристиками продукции является нелинейной, поэтому для достижения более точных моделей нужно использовать некоторую функцию от базового показателя [3].

На основе построенных регрессионных моделей формируется оптимальная технология. Данная задача решается с помощью методов условной оптимизации [4], где ограничениями выступают контрольные границы изменения технологического параметра в соответствии с ГОСТ или ТУ, а целевая минимизируемая функция – сумма квадратов отклонений рассчитанной величины от заданной. Такой подход применим только в случае «точной» оптимизации, подразумевающей, что результирующие показатели заданы точным значением. Однако обычно они определены некоторым интервалом, и в таком случае применяется дискретная оптимизация, которая использует некоторые принципы теории информации. Критерием связи технологии и выходных свойств конечной продукции при дискретной оптимизации выступает мера – количество информации [1, 5].

Результатом проведения необходимых процедур идентификации и моделирования станут рациональные технологические режимы, которые отражают значения всех регулируемых параметров производства, необходимые для создания качественной продукции.

Управление технологией подразумевает под собой нахождение такого решения поставленной производственной задачи, при котором полученные показатели качества продукции будут максимально приближаться к заданным на этапе планирования. Каждый последующий передел должен изменять технологические условия обработки полупродукта на основе информации, полученной с предыдущего передела. Такой подход позволяет оперативно вмешиваться в производство в случае отклонений, а также предоставляет более полную информацию о затратах.

# 4 Исследование объекта управления и предметной области. Выявление основных свойств и закономерностей

## 4.1 Теоретическое изучение объекта управления и предметной области. Построение теоретических математических моделей

Выбор технологических факторов.

Основными производственными переделами Новолипецкого Металлургического Комбината являются следующие цеха: КЦ-1 и КЦ-2 (конверторный цех), ПГП (горячая прокатка), ПХПП (холодная прокатка и покрытия), ПТС (производство трансформаторной стали), ПДС (производство динамной стали). Для каждого из них можно выделить показатели производства, влияющие на итоговые показатели качества стали. Химический состав стали определяется уже на этапе выплавки.

В технологических инструкциях четко фиксирован набор факторов по все переделам и определены диапазоны изменения значений факторов. Они предполагают нормальный, статистически регулируемый процесс производства, если измерения текущих показателей попадают в соответствующий диапазон. Однако, при нескольких последовательных этапах в реальных условиях вероятность получения качественной продукции ниже единицы даже при выполнении инструкций. В таком случае, необходимо выделить наиболее важные факторы, и уделять им более пристальное внимание.

Для выявления самых значимых факторов из множества факторов, определенных для процесса производства стали, использовались следующие критерии [1]:

1. Возможность регулирования фактора.

Если невозможно оперативно изменить показатель, использование его для последующего анализа нецелесообразно.

2. Оценка влияния на выходные свойства по коэффициенту парной корреляции.

Данный критерий выявляет самые значимые факторы и позволяет оценить степень важности каждого из них.

3. Оценка коэффициента корреляции факторов между собой.

Данный критерий выявляет взаимозависимые факторы. В случае высокой корреляции каких-либо пар показателей, часть из них следует исключить из рассмотрения.

Основными факторами производства являются:

* химический состав стали (содержание углерода, кремния, марганца, фосфора, серы, хрома, никеля, меди, алюминия, азота)
* температура стали при разливке;
* время выдержки в конверторе-УРНС;
* средние усилия холодной прокатки (клети 1 – 5);
* температура за пятой клетью;
* температура конца смотки;
* среднее усилие горячей прокатки (клети 6 – 12).

Основными оцениваемыми показателями качества являются механические свойства стали:

* предел текучести;
* временное сопротивление;
* отношение St/Sb;
* глубина сферической лунки;
* холодный изгиб;
* балл зерна;
* шероховатость.

Описание технологии.

В общем случае производственный процесс можно представить в виде:

* дискретных входов *V* (сырье)

*V[t]=(V1[t], V2[t], … , VL[t]),* где *L* – число входов;

* состояний *X* (технологические факторы по каждому переделу)

*x[t] = (x11[t], … , x1M1[t], x21[t], … , xkMk[t]),*

где *Mi* – число факторов *i*-го передала,

*K* – число технологических переделов;

* выходов *Y* (свойства готовой продукции, показатели качества)

*y[t] = (y1[t], … , yR[t]),*

где *R* – число показателей качества.

В соответствии с этим можно поставить технологические факторы в соответствие с состояниями *Х* (таблица 1).

Таблица 1. Факторы производства

|  |  |
| --- | --- |
| Состояние | Технологический фактор |
| **x1** | Содержание в стали C |
| **x2** | Содержание в стали Si |
| **x3** | Содержание в стали Mn |
| **x4** | Содержание в стали P |
| **x5** | Содержание в стали S |
| **x6** | Содержание в стали Cr |
| **x7** | Содержание в стали Ni |
| **x8** | Содержание в стали Cu |
| **x9** | Содержание в стали Al |

Окончание таблицы 1

|  |  |
| --- | --- |
| Состояние | Технологический фактор |
| **x10** | Содержание в стали N |
| **x11** | Температура стали при разливке |
| **x12** | Время выдержки в конверторе-УРНС |
| **x13** | Среднее усилие горячей прокатки (клеть 6) |
| **x14** | Среднее усилие горячей прокатки (клеть 7) |
| **x15** | Среднее усилие горячей прокатки (клеть 8) |
| **x16** | Среднее усилие горячей прокатки (клеть 9) |
| **x17** | Среднее усилие горячей прокатки (клеть 10) |
| **x18** | Среднее усилие горячей прокатки (клеть 11) |
| **x19** | Среднее усилие горячей прокатки (клеть 12) |
| **x20** | Среднее усилие холодной прокатки (клеть 1) |
| **x21** | Среднее усилие холодной прокатки (клеть 2) |
| **x22** | Среднее усилие холодной прокатки (клеть 3) |
| **x23** | Среднее усилие холодной прокатки (клеть 4) |
| **x24** | Среднее усилие холодной прокатки (клеть 5) |
| **x25** | Температура за пятой клетью |
| **x26** | Температура конца смотки |

Моделирование технологического процесса.

В общем виде модели имеют следующий вид [8]:

,

где - некоторая базисная функция,

- коэффициент разложения.

Первый этап является многофакторным линейным регрессионным анализом. Он состоит в нахождении линейных моделей зависимости выходных параметров от факторов. Пусть исследуется зависимость n выходных показателей от m независимых факторов. Тогда модели имеют вид:



В силу того, что значения *xi* и *yi* являются измеренными экспериментальными данными, m измерений (по количеству неизвестных) для получения адекватных моделей недостаточно, поскольку в зависимости от полученных данных, они будут существенно различаться, поэтому число n берут заведомо большим m. Для решения полученной системы линейных уравнений (СЛАУ) применяют метод наименьших квадратов (МНК) [9]. Его суть заключается в поиске такого решения, которое обращало бы систему не в верное тождество, а при котором была бы минимальна сумма квадратов отклонений левых частей уравнений от правых. Таким образом, минимизируемая функция имеет вид:



Очевидно, что эта функция является неотрицательной квадратичной, поэтому имеет единственную точку экстремума. Далее нужно найти ее частные производные и приравнять к нулю. В итоге получится система уравнений:



Приведя к стандартному виду СЛАУ, получим систему:



Данная система является симметричной, и ее решение можно найти любым применимым методом решения СЛАУ, например, методом сопряженных градиентов.

Чаще всего при построении модели используется линейная зависимость [10]. Но в реальных условиях зависимость между факторами технологии и выходными показателями может быть нелинейной. Поэтому для получения наиболее приближенных к действительному положению дел целесообразно для каждого фактора рассматривать набор заданных функций, например, степенные, логарифмические, показательные. Основанием для выбора того или иного вида функции может служить парный коэффициент корреляции фактора и выходного показателя.

Оптимизация на основании точных значений показателей.

При наличии построенных моделей технологического процесса, следующим шагом является нахождение таких значений факторов производства, при которых на выходе будет наблюдаться результат, максимально приближенный к эталонному. Для решения этой задачи подходят методы условной оптимизации. В качестве ограничений для данной задачи будут выступать регрессионные уравнения и ограничения на область допустимых значений входных параметров.

В качестве целевой минимизируемой функции выбрана функция квадрата невязки показателей качества *y*:



где *yi* – эталонное значение показателя качества, регламентируемое стандартами;

 – теоретический показатель качества продукции, при использовании оптимальной технологии с параметрами *x1-xm*.

Условная оптимизация является итерационной процедурой, в зависимости от вида используемой вспомогательной функции отличается скорость и траектория поиска решения задачи.

Общая постановка задачи условной оптимизации [4]:

|  |  |
| --- | --- |
|  |  |
|  |  |

При  имеет место задача со смешанными ограничениями, при  - задача с ограничениями неравенствами, а при  - задача с ограничениями равенствами.

Функция  называется обобщенной функцией Лагранжа, числа  - множителями Лагранжа. Классической функцией Лагранжа называется функция .

Градиентом обобщенной функции Лагранжа по  называется вектор-столбец:

|  |  |
| --- | --- |
|  |  |

Основная идея методов условной оптимизации, использующих вспомогательные функции, состоит в преобразовании приведенной задачи к задаче вида:

|  |  |
| --- | --- |
|  |  |

где Р - вспомогательная функция,

 - параметр вспомогательной функции.

Штрафные функции – добавляемая к целевой функции функция  интерпретируемая как штраф за нарушение каждого из ограничений. Штрафные функции равны нулю при соблюдении ограничений, и становятся положительным числом при их нарушении. Виды штрафных функций:

|  |  |
| --- | --- |
|  |  |

1. Квадратичный штраф используется для учета ограничений равенств:

|  |  |
| --- | --- |
|  |  |

2. Штраф типа квадрата срезки:

|  |  |
| --- | --- |
|  |  |

где  - срезка функции:

|  |  |
| --- | --- |
|  |  |

3. Бесконечный барьер является простейшим штрафом и используется в виде:

|  |  |
| --- | --- |
|  |  |

где  - множество индексов нарушенных ограничений.

Барьерные функции – к целевой функции исходной задачи добавляется слагаемое, которое не позволяет генерируемым точкам выходить за пределы допустимой области. Виды барьерных функций:

1. Логарифмический штраф:

|  |  |
| --- | --- |
|  |  |

Логарифмическая штрафная барьерная функция неопределенна в недопустимых точках.

2. Штраф, заданный обратной функцией:

|  |  |
| --- | --- |
|  |  |

При использовании барьерных функций необходимо предусматривать вычислительные процедуры, в которых в случае нарушения ограничений происходит уменьшение шага поиска, поскольку при решении именно этой подзадачи возникают затруднения. Кроме того, необходимо учитывать условие итерационных процедур:

|  |  |
| --- | --- |
|  |  |

Общая модельная схема методов последовательной безусловной оптимизации:

Шаг 1. Задать начальную точку , начальное значение параметра штрафа , коэффициент  для изменения параметра, малые числа  - параметр окончания процедуры безусловной оптимизации и  - параметр для остановки алгоритма, .

Шаг 2. Составить функцию 

Шаг 3. Найти точку  безусловного минимума функции  по  с помощью какого-либо метода. В качестве начальной точки взять . Вычислить .

Шаг 4. Проверить условие окончания:

Если , процесс поиска завершить.

Если , пересчитать  или , ,  и перейти к Шагу 2.

Корректировка технологии.

Корректировка технологии на основании точной оптимизации заключается в пересчете технологии с учетом показателей завершенных производственных переделов. Получив конкретные значения параметров x на k переделах, достаточно принять значения x1-xk за константы, и осуществить условную оптимизацию для m-k параметров по алгоритму, приведенному выше. При этом возможна ситуация, когда заново определенная оптимальная технология не может удовлетворять всем ранее выдвинутым ограничениям, а результирующая невязка является значительной. Данный факт говорит о том, что ошибки, допущенные при изготовке текущего полупродукта, являются значительными, а результирующий товар не будет соответствовать заявленным требованиям качества, однако его можно отнести в другую категорию, где он будет признан качественным.

Дискретная оптимизация.

В реальных условиях отсутствуют четкие функциональные зависимости между технологическими факторами и показателями качества проката. Помимо этого в нормативных документах для каждого свойства или параметра продукта определен диапазон значений, при которых этот продукт будет считаться качественным. Это ведет к необходимости определения управлений (значений технологических факторов) в виде диапазонов разрешенных значений.

Границы факторов технологий образуют технологическое подпространство Т+, отвечающее требования технологии Т, и T-, требованиям не отвечающее:

Т+ = {T / x’ ≤ T ≤ x’’},

T- = T \ T+.

T- и T+ образуют полное технологическое пространство Т. Точно таким же образом можно выделить 2 подпространства в пространстве выходных свойств S, задающихся стандартами.

Значения x’ и x’’ определяются экспериментально и задаются в технологических инструкциях, по сути, эти показатели определяют качество технологии. Очевидно, что для управления производством и нахождения оптимального режима, необходимо установить , определяющие глобальную технологию для данного вида продукции.

Одним из способов решения этой задачи является использование представлений теории информации [5]. При таком подходе в качестве меры связи между пространствами T и S является ITS – количество информации о свойствах, содержащееся в технологии. Количественно ITS можно определить через энтропии полей T, S, TS, которые рассчитываются с помощью формул Больцмана:

ITS = HT + HS - HTS,

Однако анализ критерия I показал, что при выбранном подходе из-за использования больцмановской энтропии максимальному значению I соответствуют диапазоны, не являющиеся оптимальными с технологической точки зрения [1, 11]. Необходимо выделить такое технологическое подпространство T+, для которого P(T+, S+) → P(T+), а P(T+, S-) → 0. При этом энтропия должна снижаться, а критерий I стремиться к максимуму. Исследование графика зависимости функции –p\*ln(p) от p показывает наличие максимум функции при вероятности р ≈ 0,37. Но при P(T+, S+) близкой к нулю или единице величина P(T+, S+) ln P(T+, S+) стремится к 0, а I возрастает. Это может привести к неверному выбору технологии. При значения P(T+, S+) > 0,37 критерий отвечает требованиям, а при P(T+, S+) < 0,37 результаты прямо противоположны.

Учитывая изложенное выше, необходимо заменить энтропию Больцмана на условную энтропию, введенную Хартли:

*H = - ln(p).*H

Это как раз позволит добиться того, что при увеличении составляющей P(T+, S+) количество информации будет возрастать.

Далее необходимо подобрать коэффициент усиления *α* для составляющей ln(p). В качестве *α* можно использовать долю объема выборки, которая должна соответствовать P(T+, S+).

Составляющая P(T+, S+) также изменяется по закону p\*ln(p), но при прохождении порога 0,37 при увеличении р составляющая P(T+, S+)lnP(T+, S+) начнет снижаться, а следовательно, критерий I будет возрастать. Чтобы этого избежать вводится коэффициент *β*, и при прохождении критической точки 0,37 заменим выражение P(T+, S+)lnP(T+, S+) на составляющую *β*P(T+, S+).

Таким образом, коэффициент *α<1* не позволяет сжимать область T+, а следовательно и (T+, S+) до малых размеров, а коэффициент *β>1* позволяет сильно расширить подпространство T+.

В результаты получается модифицированный критерий U, который имеет следующий вид [1]:

***U= -P(T+)lnP(T+) - (1-P(T+))ln(1-P(T+)) - P(S+)lnP(S+)-***

***-(1-P(S+))ln(1-P(S+)) + αlnP(T+S+) - β(P(T+)-P(T+S+)) +***

***+ (P(S+)-P(T+S+))ln(P(S+)-P(T+S+)) +***

***+ (1-P(T+)-P(S+)+P(T+S+))ln(1-P(T+)-P(S+)+P(T+S+)).***

Проверка критерия U на наличие экстремумов показывает, что функция только возрастает при увеличении P(T+S+).

Реализация процедуры выбора оптимальных границ технологических факторов осуществляется в два этапа [12]. Сначала определяются границы исследуемых показателей одним из следующих способов:

1. Технолог самостоятельно задает все границы факторов сквозной технологии.
2. Технолога задает границы лишь для интересующих его факторов, поиск остальных границ осуществляет система.
3. Выбор исходных диапазонов полностью возлагается на систему:

* технологическое пространство разбивается на ряд многомерных параллелепипедов и каждый из них рассматривается как отдельное Т+-подпространство. Все эти подпространства сравниваются между собой с помощью критерия *U* и из них выбирается тот, который имеет максимальное значение этого критерия;
* каждый технологический фактор разбивается на ряд диапазонов и для каждого диапазона формируется Т+-подпространство. При этом все остальные факторы, формирующие данные подпространства, изменяются по всему диапазону. В данном варианте степень детализации изменения фактора меняется. Он может разбиваться на 2, 3 и т.д. участков. После формирования всех возможных Т+-подпространств из них выбирается имеющее максимальное значение критерия *U*.
* в предыдущем варианте при различной степени детализации диапазона изменения фактора для каждого из них можно определить участок, имеющий свое максимальное значение критерия *U*. Из этих участков формируется новое Т+-подпространство, и для него рассчитывается значение критерия.

Результат данного этапа является исходными границами для последующего анализа. Организуется процедура сдвига границ технологических факторов с целью определения нового подпространства, для которого вероятность получения требуемых свойств выше, чем у исходного. Сдвиг производится как по нижней, так и по верхней границам для каждого фактора. После проведения одного цикла сдвигов факторов необходимо повторить в случае нахождения нового Т+-подпространства, для которого значение критерия *U* больше, чем у исходного. Новые полученные границы используются как исходные для следующего поиска.

Процедура сдвига границ прекращается, если по итогам итерации не выявлено ни одного подпространства, улучшающего значение критерия. Границы факторов технологии итогового подпространства выделяются как оптимальные, то есть обеспечивающие получение требуемых выходных свойств с максимальной вероятностью.

# 5 Эскиз технического задания на автоматизированную систему (ГОСТ 34.602-89)

Подсистема работы с БД

Подсистема дискретной оптимизации

Подсистема точной

оптимиза-ции

Подсистема моделирова-ния

База моделей и технологий

База показателей производства

Подсистема отображения и конфигурации

Рисунок 3. Функциональная структура системы.

Подсистема отображения информации и конфигурации предназначена для вывода требуемых данных на экран (технологические факторы, рассчитанные модели и оптимальные технологии) и конфигурации параметров задач (выбор необходимых факторов и показателей качества, параметров условной и дискретной оптимизации, показателей завершенных переделов для коррекции и используемая технология и др.).

Подсистема работы с базой данных отвечает за выборку из базы показателей производства данных, необходимых для решения конкретной задачи, поставленной оператором-технологом, а также за ввод рассчитанных моделей и технологий в базу данных моделей, их считывание.

Подсистема моделирования технологического процесса осуществляет построение линейных регрессионных моделей зависимости показателей качества продукции от технологических факторов на основании задания оператора-технолога, а также возможное улучшение модели за счет подбора более точных функциональных зависимостей от факторов производства.

Подсистема точной оптимизации производит решение задачи методами условной оптимизации с заданными параметрами, где в качестве результирующих показателей качества выступают четко заданные фиксированные числа. Условиями для оптимизации являются ограничения на изменение технологических факторов. Вторая решаемая задача подсистемы - корректировка текущей технологии путем пересчета оптимальной технологии с учетом показателей завершенных переделов методами условной оптимизации.

Подсистема дискретной оптимизации осуществляет нахождение оптимальной технологии для поставленной задачи в рамках интервалов результирующих показателей качества.

### 6.1.2 Схема функциональной структуры системы с кратким описанием

В составе системы можно выделить ряд модулей (рисунок 9):

* подсистема отображения информации и конфигурации;
* подсистема работы с базой данных;
* подсистема моделирования технологического процесса;
* подсистема точной оптимизации;
* подсистема дискретной оптимизации.

Рисунок 9. Функциональная структура системы.

Подсистема отображения информации и конфигурации предназначена для вывода требуемых данных на экран (технологические факторы, рассчитанные модели и оптимальные технологии) и конфигурации параметров задач (выбор исходных данных, необходимых факторов и показателей качества, параметров условной и дискретной оптимизации, показателей завершенных переделов для коррекции и используемой технологии и др.).

Подсистема работы с базой данных отвечает за выборку из базы показателей производства данных, необходимых для решения конкретной задачи, поставленной оператором-технологом, а также за ввод рассчитанных моделей и технологий в базу данных моделей, их считывание.

Подсистема моделирования технологического процесса осуществляет построение линейных регрессионных моделей зависимости показателей качества продукции от технологических факторов на основании задания оператора-технолога, а также возможное улучшение модели за счет подбора более точных функциональных зависимостей от факторов производства.

Подсистема точной оптимизации производит решение задачи методами условной оптимизации с заданными параметрами, где в качестве результирующих показателей качества выступают четко заданные фиксированные числа. Условиями для оптимизации являются ограничения на изменение технологических факторов. Вторая решаемая задача подсистемы - корректировка текущей технологии путем пересчета оптимальной технологии с учетом показателей завершенных переделов методами условной оптимизации.

Подсистема дискретной оптимизации осуществляет нахождение оптимальной технологии для поставленной задачи в рамках интервалов результирующих показателей качества.

#### 6.3.2.1 Проектирование внутримашинной информационной базы

Для описания хранимой информации были выделены следующие сущности:

* Plavka. Содержит информацию о технологических факторах, используемых для конкретной партии, стандарт, в соответствии с которым партия изготавливалась;
* Marks\_steel. Содержит ограничения на факторы и показатели качества, регламентированные государственными стандартами или техническими условиями;
* Regression\_models. Содержит информацию о построенных регрессионных моделях для технологии;
* Descret\_models. Содержит информацию о построенных дискретных моделях;
* Technology. Содержит информацию о рациональной технологии, рассчитанной по определенным моделям;
* Params. Содержит имена факторов и свойств, а также их описание;
* Users. Содержит информацию о пользователях системы.

#### 6.3.2.2 Состав и структура внутримашинной информационной базы

На рисунке 18 представлена концептуальная модель базы данных, а ее спецификация указана в таблицах 13-14. На диаграмме указаны не все атрибуты сущностей для экономии места, но они перечислены в спецификации.



Рисунок 18. Концептуальная модель базы данных

Физическая модель представлена на рисунке 19.



Рисунок 19. Физическая модель базы данных