

МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ В АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ СИСТЕМАХ УПРАВЛЕНИЯ РЕЖИМАМИ ОБЖАТИЙ НА ТОЛСТОЛИСТОВЫХ СТАНАХ

*Институт проблем математических машин и систем НАН Украины, г. Киев, Украина

Анотація. Розглянуто основні підходи до побудови математичних моделей для АСУ ТП товстолистових станів (ТЛС). Наведено математичні моделі енергосилових параметрів, які були застосовані в АСУ управління режимами обжатия на вітчизняних ТЛС і забезпечили необхідну точність реалізації геометричних розмірів листів при автоматичному управлінні.

Ключові слова: математичні моделі, товстолистовий стан, зусилля прокатки, автоматизовані системи управління.

Аннотация. Рассмотрены основные подходы к построению математических моделей для АСУ ТП толстолистовых станов (ТЛС). Приведены математические модели энергосиловых параметров, которые были применены в АСУ управления режимами обжатия на отечественных ТЛС и обеспечили необходимую точность реализации геометрических размеров листов при автоматическом управлении.

Ключевые слова: математические модели, толстолистовой стан, усилие прокатки, автоматизированные системы управления.

Abstract. The main approaches to the construction of mathematical models for automated control systems of process procedure of rolling stands were regarded. There were given mathematical models of energy-force parameters that were applied in the automated control systems of drafting schedules on domestic rolling stands. These models provided the necessary accuracy of the geometric sheet sizes realization under automatic control.

Keywords: mathematical models, rolling stand, rolling force, automated control systems.

1. Введение

Одним из наиболее важных показателей работы толстолистового стана (ТЛС) является точность реализации заданных геометрических размеров прокатной продукции. Этот показатель в значительной мере зависит от точности прогнозирования параметров прокатки по математическим моделям, на которых базируется расчет управляющих воздействий. При этом используются модели пластической деформации металла (усилия прокатки) и упругой деформации клетки, модели момента прокатки, тепловых процессов при прокатке и др.

Целью настоящей статьи является описание и сравнение известных из литературы и разработанных с участием автора математических моделей энергосиловых параметров прокатки на ТЛС. В результате этого сравнения выбраны математические модели для АСУ режимами обжатия на ТЛС, удовлетворяющие требованиям к их точности.

2. Основные подходы к построению математических моделей для АСУ ТП ТЛС

При построении математических моделей для ТЛС используются два подхода [1]. Первый предполагает получение исходной математической модели на основе анализа физических процессов, имеющих место при формировании определенных параметров, и разработку процедуры дальнейшей адаптации модели по фактическим параметрам прокатки (теоретические модели). Исходные данные констант, входящих в теоретические модели, определяются в процессе экспериментальных исследований. Второй подход предполагает построение моделей путем статистического анализа наблюдений за ходом технологического процесса и установления корреляционных связей между его основными параметрами (экспериментальные модели).

Разработке теоретических моделей предшествует продолжительное теоретическое и экспериментальное исследование процесса. Модели такого рода удобны благодаря их универсальности. Однако теоретические модели, описывающие процесс прокатки, как правило, сложны и громоздки, что объясняется высокой сложностью теоретического описания процесса прокатки. Кроме этого, некоторые аргументы моделей являются ненаблюдаемыми в процессе реальной прокатки на ТЛС вследствие отсутствия соответствующих измерительных устройств. Следует также заметить, что в ряде случаев проведение непосредственных физических экспериментов, необходимых для сбора данных при разработке математических моделей, не всегда легко осуществимы.

При разработке алгоритмов автоматического управления процессом прокатки достаточно часто используются статистические модели. При этом структуры моделей, полученные на одном стане, как правило, могут быть с успехом применены на других станах с подобными условиями прокатки. Построение математических моделей объекта или процесса по экспериментальным данным обычно осуществляется методами регрессионного анализа. Применяется также метод группового учета аргументов (МГУА).

В АСУ ТП ТЛС применяются оба типа описанных выше моделей, а также полуэмпирические модели, сочетающие в себе характеристики моделей обоих типов.

Диапазоны изменения параметров математических моделей определяются как характеристиками прокатываемых полос, так и изменением состояния механооборудования ТЛС в процессе прокатки, которые могут существенно изменяться со временем. Это объясняется механическим износом и изменением теплового профиля рабочих валков в процессе прокатки, изменением профилировки валков после их перевалки, изменением условий охлаждения полосы в зависимости от температуры окружающей среды, вариацией химического состава и физико-механических свойств прокатываемого металла, вариацией области входных переменных моделей и других факторов.

В связи с существенной нестационарностью стана как объекта управления, вызванной вышеперечисленными причинами, математические модели, полученные при исследовании объекта и используемые при проектировании системы автоматизации, необходимо непрерывно уточнять (адаптировать) в процессе эксплуатации на действующем объекте. Если уточнение не производить, то модели будут неадекватно отражать процесс и по ним невозможно будет прогнозировать поведение объекта и управлять им. Вследствие этого приходится сталкиваться с большей или меньшей начальной неопределенностью.

Возможность прогноза при неполной априорной информации обеспечивается применением методов адаптации, которые уменьшают первоначальную неопределенность за счет информации, получаемой в процессе работы объекта. Информация о процессе используется для адаптации математических моделей с целью максимального приближения рассчитываемых по ним значений параметров к их истинным значениям.

Задача адаптации сводится к оцениванию параметров моделей по результатам оценивания входных и выходных параметров, полученных в условиях нормального функционирования объекта. Здесь под оцениванием параметров подразумевается экспериментальное определение их значений при условии, что структура модели известна. При этом предполагается, что входные и выходные переменные, между которыми существует связь, известны, и что эти переменные могут быть измерены в процессе нормальной эксплуатации.

Существует достаточно большое число алгоритмов адаптации моделей. Алгоритмы адаптации, используемые в АСУ ТП прокатными станами, и результаты их применения описаны в [2–4].

3. Математические модели энергосиловых параметров в реализованных АСУ режимами обжатий на отечественных ТЛС

В АСУ режимами обжатий на отечественных ТЛС нашел широкое применение и показал положительные результаты подход с использованием полуэмпирических математических моделей в виде рекуррентных зависимостей. Требования к точности математических моделей для АСУ режимами обжатий представлены в [5].

Математическая модель усилия прокатки является важнейшей для прогноза деформации клетки и управления на базе этого толщиной, профилем и плоскостностью листа. В АСУ ТП ТЛС применяются рекуррентные модели усилия прокатки, использующие фактические значения усилия прокатки и параметров очага деформации в реализованных пропусках и тем самым дающие возможность исключить из структуры модели трудноопределяемые количественно параметры (сопротивление деформации, коэффициент трения), которые остаются неизменными в течение цикла прокатки или даже в течение прокатки партии заготовок [1].

Эти рекуррентные зависимости могут быть представлены в общем виде соотношением

$$P_i = P_{i-1} * f(G_i, G_{i-1}), \quad (1)$$

где P_i , P_{i-1} – прогнозируемое усилие в i -м пропуске и фактическое в $i-1$ -м, G_i , G_{i-1} – ожидаемые параметры очага деформации в i -м пропуске и фактические в $i-1$ -м.

Для ТЛС 2250 была разработана и внедрена математическая модель усилия прокатки в виде рекуррентного соотношения, связывающего фактические параметры прокатки, измеренные в предыдущем пропуске, и расчетные параметры последующего пропуска. Это соотношение получено на основе зависимости Орована-Паское с эмпирически рассчитанным аддитивным членом:

$$P_{i+1} = P_i \frac{B_{i+1} \sqrt{R \Delta h_{i+1}}}{B_i \sqrt{R \Delta h_i}} \cdot \frac{0,8 + \sqrt{R \Delta h_{i+1}}}{0,8 + \sqrt{R \Delta h_i}} + P_i \lg \frac{h_i}{h_{i+1}}, \quad (2)$$

где i – индекс предыдущего пропуска, $i+1$ – индекс расчетного (прогнозируемого) пропуска, B – ширина полосы, h – толщина полосы, Δh – обжатие в пропуске, R – радиус рабочих валков.

Испытания, проведенные на ТЛС 2250, показали удовлетворительную точность расчетов по приведенной модели.

Для чистовых клетей может быть использована рекуррентная модель усилия прокатки, включающая механизм уточнения прогноза по фактическим данным прокатки предыдущей заготовки, а также по данным осуществленных пропусков текущего цикла прокатки [1].

Модель использует зависимость жесткости металла q от толщины металла перед пропуском h_{ex} в предыдущем цикле и фактические параметры текущего цикла прокатки одной и той же партии. При этом q определяется как отношение P к обжатию в пропуске Δh . Вычисленные значения жесткости определяют ломаную линию, аппроксимирующую зависимость $q = f(h_{ex})$. Прогнозирование усилия прокатки основано на предположении, что жесткость металла в одноименных пропусках различных циклов прокатки при одинаковых толщинах перед пропуском отличается вследствие разницы наклона отдельных

участков кривой $q = f(h_{\text{кв}})$, причем есть преемственная связь между изменением наклона предыдущего и последующего участков. Таким образом, на основании сопоставления кривой q уже прокатанной (базовой) заготовки с участком кривой q прокатываемой заготовки, построенном по уже реализованным пропускам, производится прогноз в следующем пропуске, по которому и рассчитывается прогнозируемое усилие прокатки:

$$q'_i{}^{\bar{\delta}} = q_{i+1}^{\bar{\delta}} + \frac{(q_i^{\bar{\delta}} - q_{i-1}^{\bar{\delta}})(h_{i-2}^{\bar{\delta}} - h_{i-1}^{\bar{\delta}})}{(h_{i-2}^{\bar{\delta}} - h_{i-1}^{\bar{\delta}})} \quad (3)$$

при $i = N$ или $h_{i-1} \geq h_{i-1}^{\bar{\delta}}$;

$$q'_i{}^{\bar{\delta}} = q_i^{\bar{\delta}} + \frac{(q_{i+1}^{\bar{\delta}} - q_i^{\bar{\delta}})(h_{i-1}^{\bar{\delta}} - h_i^{\bar{\delta}})}{(h_{i-1}^{\bar{\delta}} - h_i^{\bar{\delta}})} \quad (4)$$

при $i = 1$ или $h_{i-1} < h_{i-1}^{\bar{\delta}}$;

$$q_{i+1} = \frac{q_i}{q_i^{\bar{\delta}}} q'_i{}^{\bar{\delta}} = q_{i+1}^{\bar{\delta}} K_i, \quad (5)$$

$$P_{i+1} = q_{i+1} \Delta h_{i+1}, \quad (6)$$

где $i, i+1$ – номер текущего (прогнозируемого) пропуска, $\bar{\delta}$ – индекс прокатанной (базовой) заготовки, $q^{\bar{\delta}}$ – жесткость базовой заготовки, приведенная к соответствующей толщине прокатываемой заготовки, h – толщина, N – количество пропусков в цикле прокатки, $\Delta h_{i+1} = h_i - h_{i+1}^{\bar{\delta}}$ – обжатие.

Прогнозирование усилия прокатки по этой модели основано на допущении о равенстве отношений жесткости металла q в $i+1$ -м и i -м пропусках для базовой и прокатываемой заготовок, то есть

$$\frac{q_{i+1}^{\bar{\delta}}}{q_{i+1}} = \frac{q_i^{\bar{\delta}}}{q_i}. \quad (7)$$

Рассмотрим, какими параметрами определяется соотношение $\frac{q_i}{q_i^{\bar{\delta}}} = K_i$.

Согласно работе [6],

$$P = n_{\sigma} b l_{\text{д}} 1,15 K_i K_u K_{\varepsilon} \sigma_0, \quad (8)$$

где n_{σ} – коэффициент напряженного состояния, определяемый параметрами очага деформации, b – ширина раската, $l_{\text{д}}$ – горизонтальная проекция дуги контакта, σ_0 – постоянная величина сопротивления деформации для данной марки стали при определенной температуре, степени и скорости деформации, K_i, K_u и K_{ε} – коэффициенты, учитывающие влияние соответственно температуры, скорости и степени деформации.

Так как рассматривается прокатка заготовок одной марки стали при одинаковой скорости прокатки в соответствующих пропусках и одинаковых геометрических размерах до и после пропуска, то с учетом (8) соотношение усилий прокатки в одноименных пропусках определяется выражением

$$\frac{P_i^\delta}{P_i} = \frac{K_{t_i}^\delta}{K_{t_i}}. \quad (9)$$

Согласно [6], K_{t_i} определяется выражением

$$K_{t_i} = Ae^{-\alpha t_i}, \quad (10)$$

где A и α – константы для определенной марки стали, t_i – температура в i -м пропуске.

С учетом (9) и (10) соотношение жесткостей в пропуске, предшествующем прогнозируемому, составит

$$K_i = \frac{q_i}{q_i^\delta} = e^{-\alpha(t_i - t_i^\delta)}, \quad (11)$$

то есть K_i определяется разностью температур в соответствующем пропуске базовой и прокатываемой заготовок.

Если условия охлаждения раската в паузе между i -м и $i+1$ -м пропусками указанных заготовок одинаковы, можно предположить, что $K_{i+1} = K_i$, то есть соблюдается условие (9), и прогнозирование усилия прокатки осуществляется по формулам (5) и (6). При различных условиях охлаждения раската в паузах целесообразно усилие прокатки, вычисленное по (5) и (6), уточнять путем использования в (5) вместо K_i коэффициента K_{i+1} , вычисленного по (11) в соответствии с фактической разностью температур $\delta t = t_{i+1} - t_{i+1}^\delta$, полученной по результатам замера температуры раскатов. Так как на начальной стадии внедрения коэффициент α для различных марок сталей может быть заранее (перед началом прокатки партии заготовок) не определен, то его величина определяется из выражения (11) и усредняется по данным реализованных пропусков прокатываемой и предыдущих заготовок. Таким образом производится адаптация модели.

Для определения момента прокатки M используется известная зависимость:

$$M = 2mPL_d, \quad (12)$$

где m – коэффициент плеча приложения усилия прокатки P , L_d – длина дуги захвата,

$$L_d = \sqrt{R\Delta h}.$$

Определение P описано выше, а для расчета коэффициента m используется рекуррентная зависимость, связывающая ожидаемые параметры очага деформации в прогнозируемом пропуске и фактические в предыдущем реализованном пропуске [1]:

$$m = 0,5 \frac{h_i}{\Delta h_i} \ln \frac{h_{i-1}}{h_i}. \quad (13)$$

Рекуррентные зависимости позволяют ускорить вычисления за счет использования фактических параметров в реализованных пропусках и достичь высокой точности прогноза. Для прогнозов усилия и моментов до начала прокатки могут использоваться известные эмпирические модели (нерекуррентные), которые будут давать наилучшие результаты в условиях конкретного стана [1].

Расчетная (требуемая) толщина раската определяется либо по условиям получения заданной ширины (для последнего пропуса разбивки ширины), либо по условиям реализации определенной стратегии распределения обжатий (толщин) по пропускам. Толщина готового листа определяется заданием на прокатку. При реализации заданной толщины h

возникает погрешность, вызванная погрешностью прогнозирования требуемого раствора валков H и погрешностью отработки этого раствора следящей системой. С другой стороны, упомянутая погрешность по толщине компенсируется за счет «самовыравнивания» системы клеть-металл. Прогнозирование H осуществляется по известной формуле Симса-Головина:

$$H = h - \left(x_j + \frac{P_{np}}{M_j} \right), \quad (14)$$

где h – заданная толщина раската (листа), P_{np} – прогнозируемое значение усилия прокатки, $\left(x_j + \frac{P_{np}}{M_j} \right)$ – уравнение прямой, полученной в результате линейной аппроксимации j -го участка кривой деформации клетки ($d = f(P)$, d – деформация в мм), x_j – отрезок на оси ординат, отсекаемый этой прямой, M_j – модуль клетки, соответствующий j -му участку кривой деформации.

Для каждого пропуска в черновой и чистовой клетях производится расчет минимально допустимых значений раствора валков, при которых усилие прокатки и момент прокатки достигают максимального значения, гарантирующего безаварийную работу оборудования клетей [7].

Расчет минимально допустимых значений раствора валков в черновой и чистовой клетях основан на определении максимально допустимых обжатий. Ограничения по максимуму при выборе величин обжатий с точки зрения недопущения перегрузки оборудования являются максимально допустимые усилия прокатки (P_{Don}) и момент прокатки (M_{Don}), которые определяются характеристиками оборудования. В процессе расчета допустимых обжатий используются математические модели усилия и момента прокатки и деформации клетки. Допустимые обжатия по усилию ($\Delta h_{P_{Don}}$) и моменту прокатки ($\Delta h_{M_{Don}}$) вычисляются с использованием известных итерационных процедур, а затем для дальнейших расчетов выбирается минимальное из них:

$$\Delta h_{Don} = \min (\Delta h_{P_{Don}}, \Delta h_{M_{Don}}).$$

Для иллюстрации результатов автоматического управления процессом прокатки с использованием описанных выше математических моделей в табл. 1 приведен протокол параметров процесса прокатки на ТЛС комбината «Азовсталь». В протоколе каждому пропуску соответствуют две строчки: первая – прогнозируемым параметрам, вторая – фактическим. Приведенные фактические параметры замеренные или расчетные. Измерения осуществлялись соответствующими датчиками (раствор валков, усилие прокатки), расчеты – с использованием замеренных параметров (момент прокатки, толщина и длина проката). В конце каждого цикла (после слова «итого») приводится заданная ширина листа и средняя по длине проката фактическая толщина.

Анализ результатов, полученных при автоматическом управлении прокаткой на ТЛС 3600, показал, что среднеквадратичная погрешность прогнозирования усилия прокатки по модели (3)–(6) составляла 300–800 кН, что обеспечивало характеристики точности прокатки по толщине выше заданных техническим заданием на систему автоматизации. При этом не превышались допустимые энергосиловые параметры. Полученные характеристики находятся на уровне результатов, достигнутых ведущими зарубежными фирмами.

Таблица 1. Параметры процесса прокатки в чистой клетке стана 3600.
Сляб 250×1650×2220. Лист 009,0×2530×0011,8. Марка Ст3

Номер пропуска	Раствор ненагруженных валков, мм	Толщина проката, мм	Усилие прокатки, тс	Момент прокатки, тм	Длина проката, мм
01	0017,7	0025,4	0000	0000	00000
	0017,7	0025,5	4163		01414
02	0011,6	0018,5	3758	1911	01948
	0011,6	0018,5	3743		01952
03	0006,8	0014,1	3983	1763	02554
	0006,8	0014,1	3945		02558
04	0004,0	0011,3	3686	1483	03188
	0004,0	0011,3	3710		03217
05	0003,6	0009,2	2872	1032	03896
	0003,6	0009,1	3066		03938
Итого	2530,0	0009,1			

4. Выводы

Анализ известных математических моделей энергосиловых параметров прокатки на ТЛС, которые целесообразно использовать в АСУ режимами обжатый, показал, что наиболее предпочтительными являются рекуррентные модели, использующие фактические значения параметров в реализованных пропусках и тем самым дающие возможность исключить из структуры модели трудноопределяемые количественно параметры (сопротивление деформации, коэффициент трения), которые остаются неизменными в течение цикла прокатки или даже в течение прокатки партии заготовок. В статье описаны математические модели энергосиловых параметров прокатки, которые были применены в ряде реализованных АСУ режимами обжатый на отечественных толстолистовых станах, в том числе ТЛС 3600 и ТЛС 2250. Модели показали высокие результаты в части точности прогнозирования и обеспечили необходимую точность реализации геометрических размеров листов при автоматическом управлении. Полученные характеристики находятся на уровне результатов, достигнутых ведущими зарубежными фирмами.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Иевлев Н.Г. Математические модели и алгоритмы управления в АСУ ТП толстолистовых прокатных станов / Н.Г. Иевлев, Г.Г. Грабовский. – К.: Техника, 2001. – 248 с.
2. Построение математических моделей оптимальной сложности и их адаптация в АСУ ТП ТЛС / Г.Г. Грабовский, В.В. Полещук, В.П. Твардовский [та ін.] // Автоматизация виробничих процесів. – 1997. – № 2. – С. 65 – 71.
3. Адаптивное управление точностью прокатки труб / Ф.А. Данилов, В.В. Имедадзе, Е.Д. Клемперт [и др.]. – М.: Металлургия, 1980. – 280 с.
4. Петров А.В. Исследование алгоритмов адаптации моделей температуры раската / А.В. Петров, Т.В. Котлова // Автоматизация листовых прокатных станов. – К.: Институт автоматизации, 1983. – С. 129 – 138.
5. Вимоги до точності математичних моделей в автоматизованих системах керування режимами обтискання на ТЛС / М.Г. Ієвлев, В.Б. Корбут, В.Г. Бутко [та ін.] // Науково-технічна інформація. – 2014. – № 2 (60). – С. 46 – 50.
6. Повышение точности листового проката / И.М. Меерович, А.И. Герцев, В.С. Горелик [и др.]. – М.: Металлургия, 1969. – 262 с.
7. Грабовский Г.Г. Автоматизированные системы защиты оборудования прокатных клетей от пере-

грузок и информационной поддержки процесса прокатки / Г.Г. Грабовский, Н.Г. Иевлев // Металл и литье Украины. – 2015. – № 7 (266). – С. 29 – 33.

Стаття надійшла до редакції 08.11.2017