

ИССЛЕДОВАНИЕ УПРАВЛЯЕМОСТИ И НАБЛЮДАЕМОСТИ ПРОЦЕССА НЕПРЕРЫВНОЙ ПРОКАТКИ ТРУБ НА ОПРАВКЕ

ANALYSIS OF CONTROLLABILITY AND OBSERVABILITY OF MULTISTAND PIPE MILL ROLLING

Е.М. Бородин, М.Ю. Бородин

ФГБУН Институт машиноведения УрО РАН, Екатеринбург, borodin_e@mail.ur.ru
ФГАОУ ВПО «УрФУ имени первого Президента России Б.Н.Ельцина», Екатеринбург, bmu@k66.ru

Abstract

The purpose of article is to report an approach to application of linearized mathematical models of floating mandrel multistand pipe mills. Mathematical model is supposed to be set of linear equations for single stand, assembled to whole mill model by taking in account interstand connection by velocities and tensions. Such a model can be converted to the set of ordinary differential equations when momentum equation of mandrel is taken in account. Two-stand fragment is considered. Coefficients of mathematical model are calculated by finite-element modeling with commercial FEM code DEFORM-3D. It is shown, that at least in the near-zero interstand tension case the floating mandrel velocity can be unobservable, i.e., unable to be calculated from measurements of interstand tension.

Одним из основных способов производства бесшовных горячекатаных труб является непрерывная раскатка на длинной подвижной оправке. Такой способ получения черновых труб используется, в частности на ТПА-80 (Синарский трубный завод), ТПА-30-102 (Первоуральский Новотрубный завод), ТПА-30-102(Никопольский Южнотрубный завод, Украина). Однако, данный процесс был и остается мало изученным как объект управления.

В работе В.Л. Колмогорова [1] было показано, что скорость оправки и межклетевое натяжение в прокатываемом металле имеют большое значение для безаварийной работы непрерывного стана и показателей качества труб. В частности, был сделан вывод, что необходимо поддерживать межклетевое натяжение на минимальном, по возможности нулевом уровне – то есть, обеспечить так называемую свободную прокатку. Таким образом, впервые была поставлена задача создания системы управления межклетевым натяжением в непрерывном раскатном оправочном стане.

Напомним, в работе [1] исследовался процесс прокатки на непрерывном стане с групповым приводом валков через шестеренную клетку от одного двигателя. Прокатка на таком стане была неизбежно связана с большими натяжениями. Однако, на непрерывных станах с индивидуальным приводом валков свободная прокатка не всегда оказывалась оптимальным режимом в плане устойчивости процесса. Так, неудачной оказалась система косвенного регулирования межклетевых натяжений (СКМУ), разработанная ВНИПИ “Тяжпромэлектропроект” в конце 1970-х годов [2]. Позднее, в конце 1990-х годов, при участии В.Л. Колмогорова был проведен анализ причин неработоспособности СКМУ, одним из главных выводов которого была необходимость разработки модели управления непрерывным трубным оправочным станом [3]. Данное обстоятельство делало актуальной разработку математической модели непрерывной прокатки на оправке в виде

системы алгебраических (для установившихся режимов прокатки) или обыкновенных дифференциальных уравнений и ее исследование.

В работе [4] предложена математическая модель данного процесса прокатки, основанная на системе линейных алгебраических уравнений. Для краткости, будем использовать запись матриц в клеточном виде [5]. Система уравнений модели может быть записана в виде:

$$Au = b(\Delta\Omega, \Delta V_m), \quad (1)$$

где $u = (\Delta V_o^T, \Delta V_l^T, \Delta Q^T, \Delta G^T, \Delta F_m^T)^T$ - вектор приращений выходных параметров относительно базового режима и ΔV_o - вектор приращений входных скоростей клеток, ΔV_l - вектор приращений выходных скоростей клеток, ΔQ - вектор приращений усилий, приложенных к трубе на входе в клетки стана, ΔG - вектор приращений усилий, приложенных к трубе на выходе из клетки стана, ΔF_m - вектор приращений усилий трения на оправке, создаваемых отдельными клетями, ΔV_m - скорость оправки.

Правая часть уравнения (1) является линейной комбинацией компонент $\Delta\Omega$ - вектора приращений скоростей валков и ΔV_m - приращения скорости оправки (рис.1). Компоненты матрицы A и параметры правой части $b(\Delta\Omega, \Delta V_m)$ были получены с помощью решения краевой задачи теории пластичности методом конечных элементов, реализованном в пакете прикладных программ DEFORM-3D. Принимались допущения об изотропности материала, абсолютно жестком инструменте и изотермическом характере процесса деформации. Материал заготовки предполагался вязкопластическим, условие несжимаемости материала учтено приближенно при помощи

метода штрафов. Коэффициент объемной вязкости, игравший роль параметра штрафа, выбирался из условия [6]:

$$K \geq V^2,$$

где V – максимальная скорость прокатки, мм/с. Коэффициент трения ψ (по Прандтлю – Зибелю) на поверхности контакта “валок – заготовка” равен 1.0, а на поверхности “заготовка – оправка” – 0.3.

Ввиду ограниченности вычислительных ресурсов, исследовалась прокатка в двухклетевом сегменте стана. Вычислительный эксперимент был организован по методу факторного планирования, что позволило сократить объем расчетов.

Использовался план вида 2^3 [7]. Сопоставление дополнительных расчетов по методу конечных элементов и по модели (1) показало адекватность последней. Следующий шаг в построении математической модели непрерывной прокатки как объекта управления связан

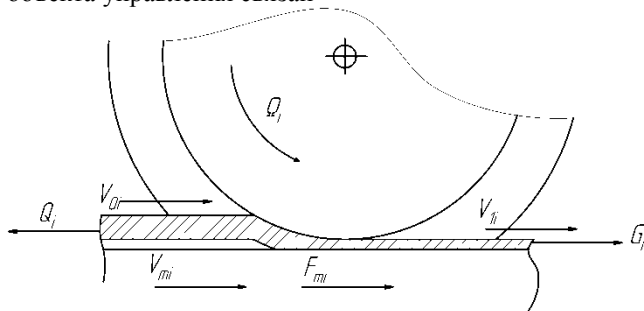


Рис. 1 – Входные и выходные переменные отдельной клетки

с учетом динамики оправки. Так как на оправку действуют лишь силы трения, ее уравнение движения будет иметь вид

$$m_{оп} \frac{d}{dt} \Delta V_m = \Delta F_m(\Delta \Omega, \Delta Q, \Delta G, \Delta V_m). \quad (2)$$

Модель, предложенная в [4], включает уравнения силовой связи клеток

$$Q_i = G_{i-1}, \quad (3)$$

и кинематической связи клеток

$$V_{0i} = V_{I(i-1)}. \quad (4)$$

Кроме того, следует отметить, что усилия межклетевого взаимодействия являются технологически существенным фактором, тесно связанным с вопросами качества труб и извлечения оправки [1]. С учетом этого соображения и уравнений (3)-(4) уравнения (1) и (2) можно записать в виде:

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \Delta V_m &= J_1 \Delta V_m + J_2 \Delta \Omega; \\ \Delta G &= B_\Omega \Delta \Omega + B_{VM} \Delta V_m; \\ \Delta Q &= C_\Omega \Delta \Omega + C_{VM} \Delta V_m. \end{aligned} \quad (5)$$

Таким образом, получена модель технологического процесса в виде динамической

системы с единственной фазовой координатой ΔV_m и двумя векторными выходами, ΔG и ΔQ . Согласно [8], в системе (5) J_2 – матрица управляемости, B_{VM} – матрица наблюдаемости по выходу ΔG , C_{VM} – матрица наблюдаемости по выходу ΔQ .

Оценки коэффициентов матриц управляемости и наблюдаемости были выполнены с помощью метода конечных элементов, с использованием приводимых в [4] данных. Для параметров калибровки К-4 восьмиклетевый непрерывный стан ТПА-80 Синарского трубного завода матрицы B_{VM} и C_{VM} оказались следующими:

$$\begin{aligned} J_1 &= (-0.36), \\ J_2 &= (21.31, -9.4724), \\ B_{VM} &= (0.0065, 0)^T, \\ C_{VM} &= (0, 0.0083)^T. \end{aligned} \quad (6)$$

Можно видеть, что $\text{rang}(J_2) = 1$, что позволяет считать систему (6) управляемой. Поскольку единственный элемент матрицы J_1 – отрицательный, система будет устойчивой.

Как можно видеть из (6), компоненты матриц B_{VM} и C_{VM} относительно малы в сравнении с коэффициентами матриц J_1 и J_2 . Максимальное значение компонент B_{VM} и C_{VM} составляют не более 2.5% от минимального компонента матрицы J_1 . Таким образом, ранг матриц B_{VM} и C_{VM} можно считать равным нулю. Это означает, что систему (5) можно считать ненаблюдаемой.

Таким образом, можно сделать вывод, что по сигналам датчиков скоростей валков, даже при наличии датчиков усилий межклетевого взаимодействия нельзя определить (восстановить) скорость оправки. Скорость оправки нужна сама по себе для правильной настройки при плавающей оправке, кроме того, важна как сигнал возмущения в задаче восстановления межклетевых усилий при отсутствии датчиков. Это означает, что система автоматического регулирования межклетевых натяжений должна содержать датчик скорости оправки. С позиций задачи построения системы управления альтернативой может служить применение удерживаемой оправки, с соответствующими технологическими ограничениями и затратами. Введение датчика скорости оправки и его использование в конструкции непрерывного стана может, таким образом, быть актуальной инженерной и

исследовательской задачей. Решение этой задачи при сравнительно небольших капитальных затратах стабилизирует качество проката и повысит надежность процесса.

Список литературы

1. Колмогоров В.Л., Швейкин В.В. О получении зазора между трубой и оправкой при прокатке в непрерывных станах // Труды УПИ, сб. 73. Исследования в области черной и цветной металлургии. Свердловск, 1958. С. 207-215.
2. Техническое задание на математическое моделирование системы управления непрерывным станом. Инв. № С25692-6 – ВНИПИ “Тяжпромэлектропроект”. – Свердловск, 1979 – 22с.
3. О.С. Сусенко, Разработка и исследование системы управления нестационарными режимами многосвязной системы главных электроприводов непрерывного трубного прокатного стана - дисс. канд. техн. наук, Екатеринбург, 1999.
4. Математическая модель непрерывной оправочной прокатки труб/ Е.М. Бородин, В.Л. Колмогоров, М.Ю. Бородин, В.В. Харитонов //Сталь. 2009. №10. С. 71-74
5. Фаддеев Д. К., Фаддеева Д. Н., Вычислительные методы линейной алгебры, 2 изд., М.- Л., 1963
6. Харитонов В.В., Бородин Е.М., Бородин М.Ю., Ананьев А.В. Конечно-элементное моделирование процесса непрерывной оправочной прокатки труб: учебное пособие. Екатеринбург: УрФУ, 2011
7. Налимов В.В. Теория эксперимента М.: Наука, 1971.
8. Основы теории автоматического управления, Часть 1. Линейные непрерывные системы управления.: Учебное пособие / Е.Э. Страшинин. Екатеринбург: УГТУ, 2000