

УДК 621.771.2:681.513.6

А.А. БОРИСОВ (канд.техн.наук, доц.), А.Н. МИНТУС (канд.техн.наук, доц.)

Донецкий национальный технический университет

mintus_andrey@ukr.net

АВТОМАТИЧЕСКОЕ УПРАВЛЕНИЕ ГЛАВНЫМ ПРИВОДОМ ПЕРВОЙ КЛЕТИ ЛИСТОПРОКАТНОГО СТАНА С РЕГУЛИРОВАНИЕМ МОЩНОСТИ ДВИГАТЕЛЯ

В статье рассмотрена постановка задачи автоматического управления главным приводом первой клетки листопрокатного стана с целью стабилизации скорости проката на выходе клетки и его натяжения между первой и второй клетью стана. Предложен вариант решения данной задачи, использующий принцип управления с регулированием мощности электродвигателя главного привода. Предложена структура соответствующей адаптивной системы автоматического управления с эталонной моделью и вариант математического аппарата алгоритма её настройки.

Актуальность темы. Модернизация непрерывных прокатных станов является важной задачей металлургической промышленности Украины. Реконструкция цехов непрерывной холодной прокатки листа с целью производства продукции, удовлетворяющей современным требованиям, позволит украинским предприятиям эффективно конкурировать с мировыми производителями.

В данное время у специалистов в области прокатки является неопровержимым тот факт, что, без эффективной системы автоматического управления прокатным станом, получить качество металлического листа, которое удовлетворяло бы современным требованиям, невозможно. Это, в первую очередь, связано с необходимостью согласования работы нескольких клетей, которые влияют одна на другую через металлическую полосу. Совершенствование математического описания динамики непрерывной прокатки с точки зрения автоматизации методов управления непрерывным станом и создание таких систем, которые бы, учитывая специфические особенности непрерывного стана, повышали бы эффективность его функционирования и качество производимой продукции, является важной научной задачей.

Постановка задачи. В [1,2] был предложен способ холодной прокатки листа, при котором разнотолщинность подката максимально устраняется первой клетью непрерывного стана, а в последующих клетях достигается его необходимое обжатие. Таким образом, возмущение на входе стана не распространяется по всему стану. Было показано, что при увеличении толщины подката на входе в первую клеть, её целесообразно определить замедлять. Это позволяет стабилизировать скорость проката на выходе клетки и его натяжение между первой и второй клетью стана. Одним из способов осуществления такого режима является управление главным приводом клетки с регулированием мощности, с целью её стабилизации.

Вариант решения задачи. Мощность электродвигателя клетки без учёта потерь может быть выражена как электрическими, так и механическими величинами:

$$P = ui = \omega M = \nu F, \quad (1)$$

где P - мощность электродвигателя, u - напряжение на двигателе, i - ток двигателя, ω - угловая скорость двигателя, M - момент двигателя, ν - линейная скорость проката, F - сила деформации металла.

Потребляемая мощность двигателя главного привода клетки прокатного стана содержит следующие составляющие:

$$P_{\text{ГП}} = P_{\text{ХХ}} + P_{\text{Д}} + P_{\text{ДИН}} + P_{\text{T0}} - P_{\text{T1}},$$

где $P_{\text{ГП}}$ - полная мощность двигателя главного привода, $P_{\text{ХХ}}$ - мощность холостого хода валковой системы, $P_{\text{Д}}$ - мощность деформации проката, $P_{\text{ДИН}}$ - динамическая мощность сил инерции, $P_{\text{T0}}, P_{\text{T1}}$ - мощности, обусловленные наличием натяжений проката соответственно до и после клетки.

Кинематическая схема двух приводной валковой системы с упругой связью через прокатываемый лист приведена на рис. 1 (здесь H – толщина проката).

Идея управления первой клетью непрерывного стана заключается в поддержании мощности деформации прокатываемого материала $P_{\text{Д}}$ с целью стабилизации скорости выхода проката из клетки и таким образом уменьшения колебаний межклетевого натяжения вызванных разнотолщинностью подката.

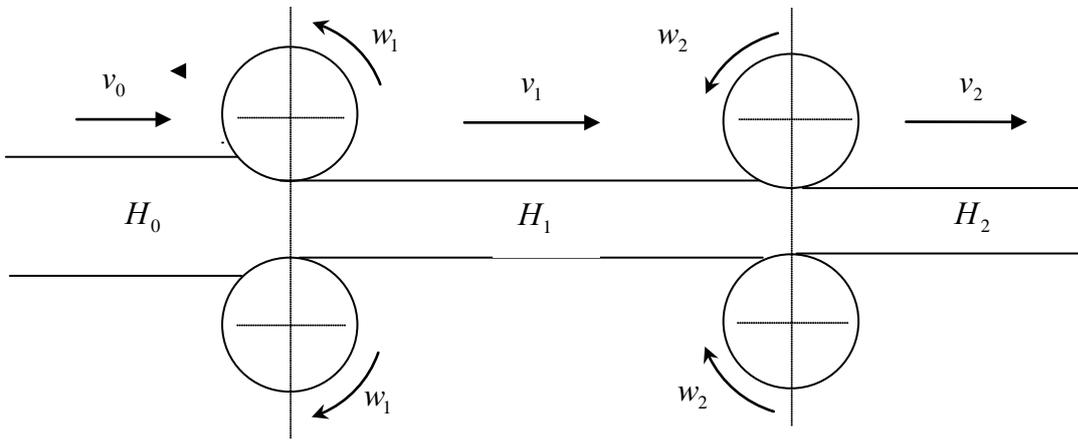


Рисунок 1 - Кинематика двух приводной системы с упругой связью через лист

Структура математической модели объекта управления на базе стандартной модели двигателя постоянного тока [3] может быть представлена в виде, показанном на рис. 2. Здесь R – радиус валка, k_{wv} – коэффициент, учитывающий особенности взаимосвязи угловой и линейной скоростей при прокатке.

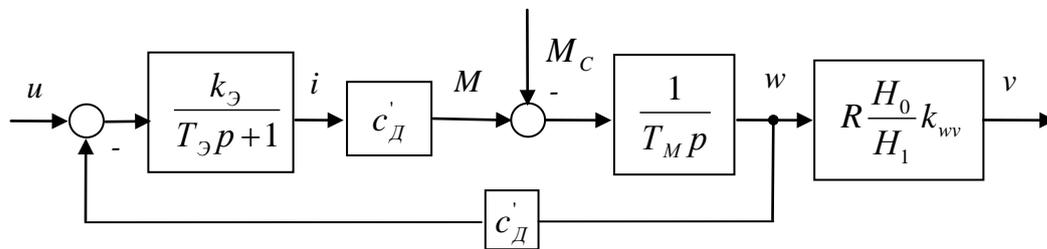


Рисунок 2 - Модель главного привода первой клетки прокатного стана как объекта управления

Одной из проблем рассматриваемого управления является проблема достаточно точного выделения мощности деформации прокатываемого материала $P_d = P_{гп} - P_{xx} - P_{дин} - P_{T0} + P_{T1}$. Однако, мощность холостого хода валковой системы P_{xx} является относительно постоянной величиной и может быть измерена в ненагруженной клетке, P_{T0}, P_{T1} могут вычисляться на основе измеряемых натяжений, $P_{дин}$ определяется постоянной времени валковой системы. Таким образом, введя в систему управления $P_0 = P_{xx} + P_{T0} - P_{T1}$, можно вычислить мощность деформации P_d .

Но в процессе прокатки могут изменяться её технологические параметры (температура, жёсткость подката и т. п.) [4]. Поэтому целесообразна разработка адаптивной системы управления клетью, в которой, наряду с другими параметрами, уточняется значение P_d .

Возможная структура адаптивной системы автоматического управления с эталонной моделью и регулированием по мощности главного привода клетки прокатного стана показана на рис. 3.

Здесь, PM – регулятор мощности, PT – регулятор тока, $W_{п}(p)$ – передаточная функция вентильного преобразователя, $W_{\omega}(p)$ – передаточная функция якорной цепи, $W_{pv}(p)$ – передаточная функция мощность – линейная скорость проката, ΔH_c – возмущение толщины подката, k_{HI} – коэффициент пропорциональности изменения тока от толщины подката, k_{pV} – коэффициент пропорциональности линейной скорости от мощности, k_p – коэффициент уточнения P_d . В данной системе коэффициенты k_{HI}, k_{pV}, k_p являются условно-постоянными. Для качественной работы системы управление они должны достаточно точно идентифицироваться и изменяться в соответствии с дрейфом параметров клетки прокатного стана как объекта управления.

Таким образом, возникает постановка задачи адаптивного управления, в которой поведение объекта зависит от вектора $\bar{y}^T = [k_{HI}, k_{pV}, k_p] \in \mathfrak{R}$, где \mathfrak{R} – множество возможных значений \bar{y} , определяющее класс

допустимых возмущений коэффициентов k_{HI}, k_{PV}, k_p . Вектор $\bar{\gamma}$ квазистационарный: постоянный или изменяется медленно (медленнее динамических процессов в объекте и изменений внешних влияний).

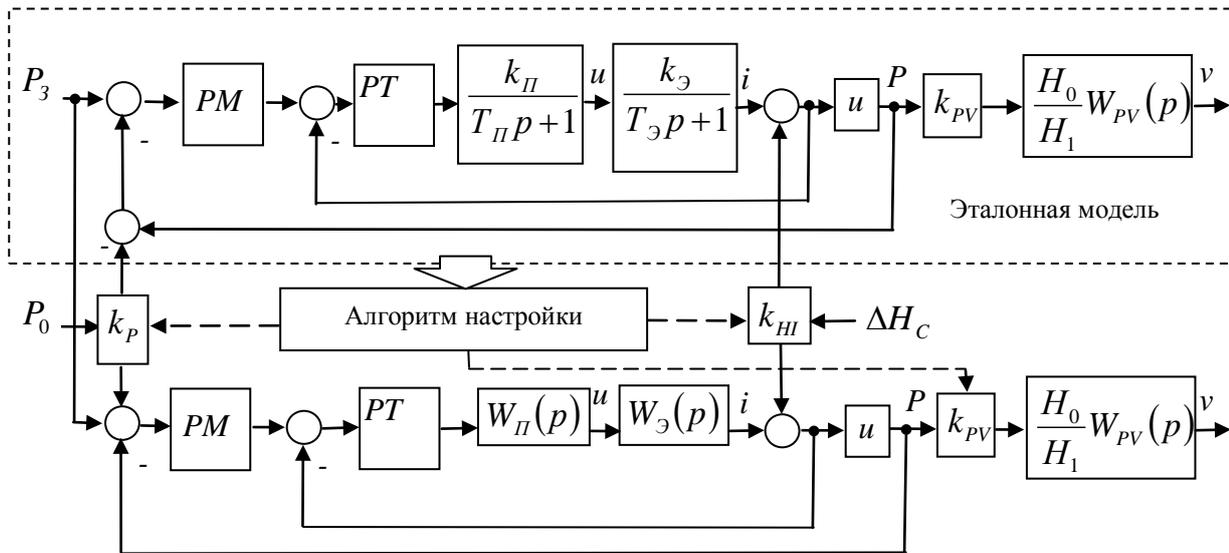


Рисунок 3 – Структура системы автоматического управления с регулированием мощности главного привода клети прокатного стана

Требуется синтезировать алгоритм адаптивного управления, который имеет двухуровневую структуру и использует величины, которые измеряются или вычисляются на основе измерений. Алгоритм регулирования 1-го (основного) уровня зависит от вектора параметров регулятора и алгоритм 2-го уровня - изменяет (настраивает) вектор параметров регулятора таким образом, чтобы обеспечить достижение цели управления при неизвестном $\bar{\gamma}$.

Вариант алгоритма настройки системы. Для современных условий цифрового управления разработку алгоритма целесообразно осуществлять, используя метод параметров состояния.

Пусть главный привод клети прокатного стана описывается уравнением состояния

$$\bar{x}(k+1) = A\bar{x}(k) + B\bar{u}(k), \tag{2}$$

где: $\bar{x}(k)$ - вектор состояний привода клети прокатного стана; $\bar{u}(k)$ - вектор управлений; $A, B - n \times n$ и $n \times m$ постоянные матрицы параметров привода. При этом на объект управления воздействуют не измеряемые возмущения и управляющие воздействия, а наблюдения доступны исходные переменные объекта.

Рассмотрим задачу обеспечения желаемого режима работы клети стана, задаваемого с помощью эталонной модели

$$\bar{x}_M(k+1) = A_M\bar{x}_M(k) + B_M\bar{u}_M(k), \tag{3}$$

где $\bar{x}_M(k)$ - вектор состояния эталонной модели, $\bar{u}_M(k)$ - вектор управляющих воздействий. При этом данная модель должна быть устойчивой, то есть матрица A_m - гурвицева.

Будем считать, что вектор параметров $\bar{\gamma}$ клети, который состоит из коэффициентов матриц A и B , заранее не определен. Известно лишь, что $\bar{\gamma} \in \mathfrak{R}$. Множество \mathfrak{R} можно задать, например, с помощью максимальных и минимальных значений, которые могут принимать параметры клети прокатного стана в процессе её работы.

Формализуем цель управления, требуя, чтобы

$$\lim e(k) = 0, \tag{4}$$

где $\bar{e}(k) = \bar{x}(k) - \bar{x}_M(k)$ - ошибка системы.

Синтез основного контура осуществим для типичных расчетных параметров клети стана. Для получения структуры «идеального» регулятора запишем уравнения в отклонениях

$$\bar{e}(k+1) = A_M\bar{e}(k) + (A - A_M)\bar{x}(k) + B\bar{u}(k) - B_M\bar{u}_M(k). \tag{5}$$

Потребуем выполнения условия разрешимости уравнения

$$(A - A_M)\bar{x}(k) + B\bar{u}(k) - B_M\bar{u}_M(k) = 0. \tag{6}$$

При этом уравнение (5) будет иметь вид

$$\bar{e}(k+1) = A_M \bar{e}(k), \quad (7)$$

решение которого асимптотически устойчиво в силу гурвицевости матрицы A_M и, в идеальных условиях, цель управления (4) достигается.

Пусть идеальное управление, которое удовлетворяет соотношению (6), описывается уравнением

$$\bar{u}_M(k) = K_{XII} K_{YII} \bar{x}(k) + K_{YII} \bar{u}_M(k), \quad (8)$$

где K_{XII}, K_{YII} - матрицы идеальных коэффициентов регулятора, которые удовлетворяют уравнениям

$$BK_{XII} = A_M - A, BK_{YII} = B_M.$$

Выберем структуру основного контура в виде

$$\bar{u}(k) = K_X K_Y \bar{x}(k) + K_Y \bar{u}_M(k), \quad (9)$$

где K_X, K_Y - матрицы коэффициентов регулятора, которые настраиваются.

Подставляя (9) в уравнения (5), получаем описание процесса настраивания, который состоит из объекта управления (2), модели (3) и регулятора основного контура (9),

$$\begin{aligned} \bar{e}(k+1) &= A_M \bar{e}(k) + B_M (K_X(k) - K_{XII}) \bar{x}(k) + \\ &+ B_M [(K_{YII})^{-1} K_Y(k) - I] \times (K_X(k) \bar{x}(k) + \bar{u}_M(k)) = \\ &= A_M \bar{e}(k) + B_M [\Phi(k) \bar{x}(k) + \Psi(k) K_Y(k) (\bar{u}_M(k) + K_X(k) \bar{x}(k))], \end{aligned} \quad (10)$$

где $I - m \times m$ единичная матрица, $\Phi(k), \Psi(k)$ - матрицы отклонений коэффициентов регулятора от «идеальных» значений

$$\Phi(k) = K_X(k) - K_{XII}, \quad \Psi(k) = (K_{YII})^{-1} - (K_{YK}(k))^{-1}. \quad (11)$$

Для синтеза контура адаптации, то есть алгоритма настраивания матриц $K_X(k)$ и $K_Y(k)$ запишем уравнения процесса в виде

$$\bar{e}(k+1) = A_M \bar{e}(k) + B_M \Theta(k) \Sigma(k), \quad (12)$$

где $\Theta(k) = (\Phi(k); \Psi(k))$ - расширенная матрица отклонений коэффициентов, которые настраиваются, от их «идеальных» значений,

$$\Sigma(k) = \left(\frac{\bar{x}(k)}{K_Y(k) [\bar{u}_M(k) + K_X(k) \bar{x}(k)]} \right) - p \times 1 \text{ вектор сенсоров (вектор, элементы которого являются}$$

измеряемыми или расчетными функциями), $p = n + m$.

Рассмотрим в качестве претендента на роль функции Ляпунова квадратичную скалярную функцию вида

$$V = 0.5 \bar{e}^T H \bar{e} + 0.5 \text{tr}(\Theta^T \Gamma^{-1} \Theta), \quad H = H^T, \Gamma = \Gamma^T. \quad (13)$$

Здесь tr означает сумму элементов главной диагонали матрицы (след матрицы).

Определим производную функции (13), используя уравнения процесса (12)

$$\begin{aligned} \dot{V} &= \bar{e}^T H \dot{\bar{e}} + \text{tr}(\dot{\Theta}^T \Gamma^{-1} \Theta) = \bar{e}^T H A_M \bar{e} + \bar{e}^T H B_M \Theta \Sigma + \text{tr}(\dot{\Theta}^T \Gamma^{-1} \Theta) = \\ &= \bar{e}^T H A_M \bar{e} + \text{tr} \left[B_M^T H \bar{e} \Sigma^T + \Gamma^{-1} \dot{\Theta} \right] \end{aligned}$$

Нетрудно заметить, что если алгоритм адаптации избран в виде

$$\dot{\Theta} = -\Gamma B_M^T H \bar{e} \Sigma^T(k), \quad \Gamma = \Gamma^T > 0, \quad (14)$$

то функция V владеет свойствами

$$V > 0 \quad \text{и} \quad \dot{V} < 0,$$

то есть выступает в качестве функции Ляпунова.

Последнее утверждение вытекает из гурвицевости матрицы A_M , для которой в силу леммы Ляпунова существует $H = H^T > 0$, что удовлетворяет матричному управлению

$$A_M^T H + H A_M = -Q, \quad Q = Q^T > 0$$

и $\dot{V} = -0.5 \bar{e}^T Q \bar{e}$. (15)

Таким образом, система (12), (14) устойчива и в силу (15) цель управления $\bar{e}(k) \rightarrow 0$ достигается. Так как \dot{V} не содержит в явном виде параметров, которые настраиваются, то из приведенных соображений вытекает лишь ограниченность матрицы Θ .

Для реализации алгоритма адаптации следует записать уравнения (14) в терминах матриц настраиваемых коэффициентов $K_X(k), K_Y(k)$. Для этого достаточно представить Γ в виде

$$\Gamma = \begin{pmatrix} \Gamma_1 & 0 \\ 0 & \Gamma_2 \end{pmatrix},$$

где $\Gamma = \Gamma^T > 0$ - квадратичные матрицы соответствующих размеров. При этом система (14) записывается в виде:

$$\Phi = -\Gamma_1 B_M^T H \bar{e}(k) \bar{x}^T(k),$$

$$\Psi = -\Gamma_2 B_M^T H \bar{e}(k) (\bar{u}_M + K_X \bar{x})^T (K_Y)^T.$$

Используя равенства (11), с учетом $K_X \equiv 0, K_Y \equiv 0$, получаем:

$$K_X(k) = -\Gamma_1 B_M^T H \bar{e}^T \bar{x}(k),$$

$$K_Y(k) = -K_Y \Gamma_2 B_M^T H \bar{e} (\bar{u}_M + K_X \bar{x})^T (K_Y)^T K_Y.$$

Структурная схема адаптивной системы управления приводом клетки представлена на рис. 4.

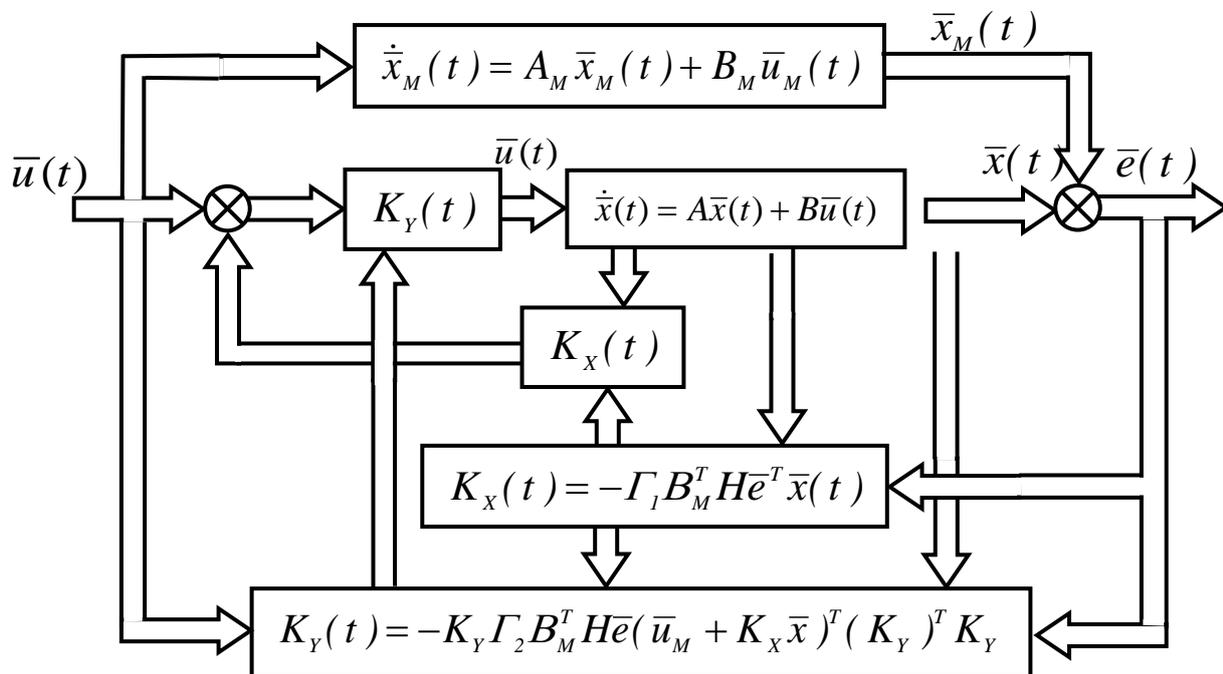


Рисунок 4 - Структурная схема адаптивной системы управления главным приводом клетки

ЛИТЕРАТУРА

1. Борисов А.А. Разработка двумерной системы управления клетью непрерывного листопрокатного стана / А.А. Борисов // Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія: Електротехніка та енергетика. – 2003. – Вип. 67. – С. 195–198.
2. Борисов А.А. Управление прокатным станом как многосвязным объектом с переменным межклетевым запаздыванием / А.А. Борисов, Г.В. Мокрый, С.С. Батыр // Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія: Обчислювальна техніка та автоматизація. – 2007. – Вип. 112 (118). – С. 11-17.
3. Башарин А.В. Управление электроприводами: учебное пособие для вузов / А.В. Башарин, В.А. Новиков, Г.Г. Соколовский. – Л.: Энергоатомиздат. Ленинградское отделение, 1982. – 392 с.
4. Тимошенко Э.В. Синтез систем управления параметрами полос при холодной прокатке / Э.В. Тимошенко, А.А. Самецкий. – К.: НВК «КІА», 1999. – 264 с.

Надійшла до редколегії 11.09.2010

Рецензент: О.І. Толочко

О.О. БОРИСОВ, А.М. МІНТУС
Донецький національний технічний університет

A. BORISOV, A. MINTUS
Donetsk National Technical University

Автоматичне управління головним приводом першої кліті листопрокатного стану з регулюванням потужності електродвигуна. У статті розглянута постановка задачі автоматичного управління головним приводом першої кліті листопрокатного стану з метою стабілізації швидкості прокату на виході кліті і його натягнення між першою та другою кліттю стану. Запропонований варіант рішення даної задачі, що використовує принцип управління з регулюванням потужності електродвигуна головного приводу. Запропонована структура відповідної адаптивної системи автоматичного управління з еталонною моделлю і варіант математичного апарату алгоритму її настройки.

Automatic Control of the Main Drive of the First Stand of Sheet-Rolling Mills with Regulation of Electric Motor Capacity. The paper formulates the problem of automatic control of the main drive of the first stand of sheet-rolling mills with the purpose of stabilizing the speed of rolled metal at the stand output and its tension between the first and the second mill stands. We suggest a way of solving this problem using a method of control with regulation of main drive electric motor capacity. The structure of corresponding adaptive system of automatic control with reference model and a mathematic algorithm of its adjustment are offered.