

**Розділ 1. Автоматизація технологічних процесів**

УДК 621.771.2:681.513.6

**Борисов А.А.**

Донецкий национальный технический университет, г. Донецк  
кафедра автоматизации и телекоммуникаций  
E-mail: [a-a-borisov@mail.ru](mailto:a-a-borisov@mail.ru)

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭКСЦЕНТРИСИТЕТА ВАЛКОВ ПРОКАТНОЙ КЛЕТИ И  
ОЦЕНКА СПОСОБОВ ЕГО УМЕНЬШЕНИЯ САУ****Аннотация**

*Борисов А.А. Моделирование эксцентриситета валков прокатной клетки и оценка способов его уменьшения САУ. В статье проанализирована проблема эксцентриситета валков прокатной клетки. Рассмотрены особенности моделирования биений валковой системы. Приведен сравнительный анализ известных способов компенсации эксцентриситета валков. Предлагается система управления с учётом биений валковой системы.*

**Ключевые слова:** биения валковой системы, эксцентриситет, гидронажимное устройство, амплитуда гармоника

**Общий анализ проблемы.** Понятие «эксцентриситет опорных валков» охватывает все факторы, которые воспринимаются как биение межвалкового зазора [1]. Основная трудность, создаваемая эксцентриситетом валков для автоматического регулирования толщины, определяется высокой частотой этого возмущения. Другая трудность заключается в том, что разнотолщинность горячекатаной полосы содержит высокочастотную составляющую, определяемую эксцентриситетом валковой системы стана горячей прокатки. Поскольку диаметры опорных валков полосовых станов горячей и холодной прокатки практически одинаковы, возникает проблемой разделения двух практически периодических сигналов, имеющих близкие по величине амплитуды, частоты которых отличаются не более чем на 15—30%, но один из этих сигналов привносится в виде возмущения толщины поступающей в клеть полосы, которое должно быть устранено, а другой сигнал является возмущением со стороны самой прокатной клетки, которое не должно быть перенесено на полосу в виде ее разнотолщинности. При прокатке в клетю, имеющей опорные валки диаметром порядка 1300—1500 мм, со скоростью 3—5 м/с, частота возмущения межвалкового зазора, вызванного эксцентриситетом опорных валков, достигает 0,6—1,0 Гц и увеличивается до 1,5—2,0 Гц при увеличении скорости прокатки до 8—10 м/с, а частота высокочастотной составляющей разнотолщинности поступающей в клетю полосы достигает 0,5—0,9 Гц или несколько выше при увеличении скорости прокатки. Разнотолщинность поступающей в клетю полосы, имеющая такую высокую частоту, не может быть устранена путем регулирования заднего натяжения полосы из-за невысокой полосы пропускания контуров регулирования натяжения полосы со стороны разматывающей моталки. Это можно сделать только лишь с помощью гидронажимного устройства, полоса пропускания которого может достигать 15 Гц и более. Таким образом, по мере совершенствования систем автоматического регулирования толщины полосы, необходимо совершенствовать методы компенсации эксцентриситета валковой системы.

**Особенности моделирования эксцентриситета валков.**

Современная технология производства и шлифовки валков позволяет достигнуть

максимальной величины эксцентриситета валков, не превышающей 0,005 мм [1]. При этом следует подчеркнуть, что перешлифовка шеек опорных валков, которая может иметь место при износе шеек в результате сухого трения при трогании клетки с места при значительных усилиях прокатки, может привести к ухудшению состояния опорных валков, поскольку шлифовальные станки в цехах холодной прокатки не позволяют осуществить шлифовку бочки опорного валка и его шеек с одной установки валка на шлифовальном станке. Необходимость в перешлифовке шеек опорных валков никогда не возникает за весь период службы опорного валка, включая перешлифовки бочки валка, если валковая группа клетки стана оборудована гидростатическими системами подпора шеек опорных валков в подшипниках жидкостного трения, поскольку принудительное всплытие шеек опорных валков до их трогания с места полностью исключает износ шеек опорных валков благодаря отсутствию сухого трения и радикальному уменьшению момента трогания клетки.

Экспериментальные исследования валковой системы, выполненные в различных цехах холодной прокатки, показали, что амплитуда основной гармоники составляет не менее 80% полной амплитуды биения валков [1]. Следовательно, простейшая модель четырёхвалковой системы (рис.1-а) может учитывать только гармонику биений опорных валков может быть представлена в виде:

$$e_o(t) = e_{BO} \sin(w_{BO}t + \varphi_{BO}) + e_{HO} \sin(w_{HO}t + \varphi_{HO}),$$

где  $e_o(t)$ - биения валковой системы,  $e_{BO}, e_{HO}$ - амплитуда эксцентриситета,  $w_{BO}, w_{HO}$  - угловые скорости,  $\varphi_{BO}, \varphi_{HO}$  - фазы, соответственно верхнего и нижнего опорного валка.

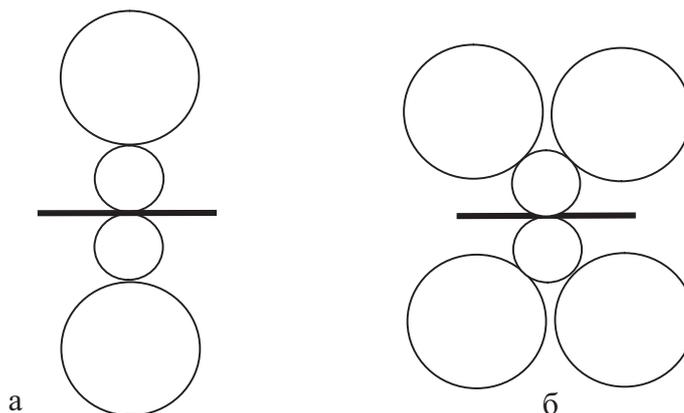


Рисунок 1 - Четырёхвалковая (а) и шестивалковая (б) система клетки прокатного стана

Далее анализируя четырёхвалковую систему можно заключить, что остальные порядка 20% биений вызваны эллипсоидностью рабочих валков и неидеальностью окружностей валковой системы. Поскольку неидеальность окружностей валков имеет случайный характер, даёт наиболее высокочастотную погрешность и вносит наименьший вклад в общий спектр биений, её учёт в модели в большинстве случаев нецелесообразен и в общем случае может быть добавлен в модель как случайный сигнал. Модель с учётом эллипсоидности рабочих валков может иметь вид:

$$e_4(t) = e_{BO} \sin(w_{BO}t + \varphi_{BO}) + e_{HO} \sin(w_{HO}t + \varphi_{HO}) + e_{BP} \sin(w_{BP}t + \varphi_{BP}) + e_{HP} \sin(w_{HP}t + \varphi_{HP}).$$

Для шестивалковой системы (рис.1-б) модель ещё больше усложняется, так как необходимо учитывать биения четырёх опорных валков

$$e_6(t) = e_{BO1} \sin(w_{BO1}t + \varphi_{BO1}) + e_{BO2} \sin(w_{BO2}t + \varphi_{BO2}) + e_{HO1} \sin(w_{HO1}t + \varphi_{HO1}) + e_{HO2} \sin(w_{HO2}t + \varphi_{HO2}) + e_{BP} \sin(w_{BP}t + \varphi_{BP}) + e_{HP} \sin(w_{HP}t + \varphi_{HP})$$

Очевидно, для многовалковых систем модели ещё больше усложняются.

Также при прокатке листа на станах холодного проката возникает проблема, заключающаяся в том, что все валки, участвующие в процессе прокатки, перемещаются в

клетки аксиально в различном направлении и за счет прижима к имеющимся фиксаторам генерируют осевые силы. Из этих осевых сил вместе с соответствующей реактивной силой в промежутке от центра валков до точки соприкосновения с соседним валком возникают свободные пары сил. Каждая из этих пар вызывает в валковых опорах и тем самым и в обеих поперечинах станины клетки реактивные силы.

Горизонтальные силы представляют собой скользящие векторы, то есть они могут перемещаться вдоль линии их действия. Вследствие этого не имеет значения, на какой стороне клетки зафиксирован валок. В принципе такие пары сил образуются всегда в результате осевой силы в зоне контакта с соседним валком. Отдельные силы накладываются друг на друга и проявляются в различных осевых силах на всех участвующих валках вместе с трудно фиксируемой реактивной силой в станинах прокатных клеток. Реактивные силы оказывают чрезвычайно отрицательное воздействие, особенно в станинах реверсивных клеток. При изменении направления вращения изменяется также направление перемещения всех участвующих валков. Валки вращаются в противоположную сторону, что влечет изменение направления осевых сил. Соответственно в станинах прокатных клеток происходит изменение реактивных сил, в результате чего посылаются сообщения об изменениях, не связанных непосредственно с процессом прокатки, в установленных на станинах динамометрах. Следствием является ошибочная реакция всех контуров системы регулирования, которые зависят от сил, измеренных в станинах прокатных клеток, таких как регулирование плоскостности, автоматическая калибровка с целью регулирования параллельности зазора между валками, устройство управления центрированием валков для компенсации влияния эксцентричного положения проката и другие контуры системы регулирования в зависимости от вида прокатной клетки и проката.

#### **Анализ и сравнение известных способов компенсации эксцентриситета валков.**

В ведущих промышленных странах по направлению разработки технологий для компенсации эксцентриситета валков зарегистрировано более сотни патентов [1]. Подавляющее большинство этих изобретений посвящено разработке различных средств измерения и запоминания эксцентриситета опорных валков для последующего использования этого сигнала при прокатке (в качестве сигнала датчика эксцентриситета), либо для выделения сигнала эксцентриситета опорных валков из общего сигнала усилия прокатки в процессе прокатки. Разработаны очень интересные и надежные технологии, которые нашли достаточно широкое применение на многих станах холодной прокатки.

Анализируя предлагаемые способы можно выделить два основных направления:

- экспериментальное определение эксцентриситета опорных валков путем проворачивания валков в состоянии «забоя» без металла в валках, измерения усилий прокатки для различных известных взаимных положений опорных валков, расчета распределения величины эксцентриситета вдоль окружности бочки каждого опорного валка, запоминания этой информации для последующего извлечения ее с целью ввода в контур измерения положения валков при прокатке. Здесь проблему выработки валков можно легко решить путем периодического повторения процедур автоматического определения эксцентриситета опорных валков, на выполнение которой требуется лишь время, необходимое для проворачивания валков в состоянии «забоя» до тех пор, пока угловое положение (фаза) одного из опорных валков не изменится на  $180^\circ$  по отношению к угловому положению (фаза) другого опорного валка, т.е. пока опорный валок меньшего диаметра не «убежит» на пол-оборота вперед от опорного валка большего диаметра — все процедуры обработки информации об усилии прокатки осуществляются автоматически в процессе проворачивания валков.

- определение эксцентриситета обоих опорных валков, включая их амплитуды и фазы, в процессе прокатки путем сбора информации об усилии прокатки в пределах полного оборота опорного валка с последующим расчетом амплитуд и фаз сигналов эксцентриситета

каждого опорного вала на основе разложения полученной информации об усилении прокатки в ряды Фурье. Этот способ автоматически учитывает изменение конфигурации опорных валков вследствие их выработки, если эти изменения влияют на картину эксцентриситета опорных валков.

Основными особенностями обоих описанных способов является обязательная установка на обоих опорных валках датчиков угла поворота валков для привязки информации об эксцентриситете опорных валков к соответствующим точкам окружности бочки каждого опорного вала, чтобы она извлекалась затем при прокатке при подходе соответствующих образующих бочек опорных валков к зонам контакта с рабочими валками. Следует отметить, что установка датчиков углов поворота на опорных валках является достаточно сложной задачей, а эксплуатация этих датчиков требует внимательного обращения с ними.

**Предлагаемое решение.**

С целью уменьшения количества клетей оснащённых системами компенсации биений валков, предлагается технологическая схема многоклетевого прокатного стана [2], в которой первая клетя является «жёсткой» с поддержанием постоянной мощности деформации прокатываемого материала, все последующие клетки, кроме последней, «мягкими», обеспечивающими только требуемое обжатие металлического листа, а последняя «жёсткой», наиболее точной, обеспечивающей требуемые показатели качества листопроката. При этом регулирование толщины в первой клетке осуществляется по отклонению, а последней клетки – по возмущению. Здесь управление первой клетью непрерывного стана заключается в поддержании постоянной мощности деформации прокатываемого материала  $P_d$  с целью стабилизации скорости выхода проката из клетки и таким образом уменьшения колебаний межклетевого натяжения вызванных разнотолщинностью подката и биениями валковой системы. Структура математической модели главного привода первой клетки как объекта управления на базе стандартной модели двигателя постоянного тока [3] может быть представлена в виде, показанном на рис. 2.

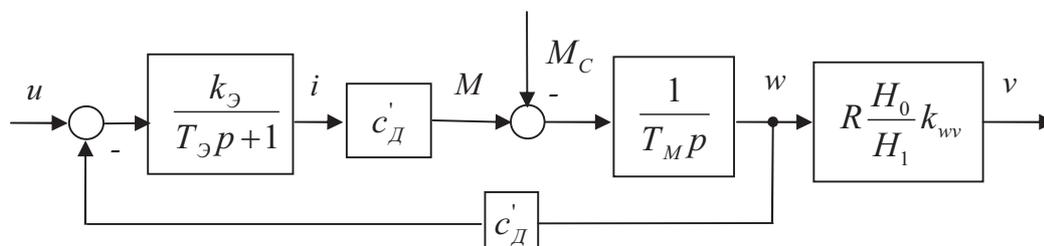


Рисунок 2 - Модель главного привода первой клетки прокатного стана как объекта управления

Здесь  $R$  – радиус вала,  $H_0, H_1$  – толщина проката соответственно до и после прокатной клетки,  $k_{wv}$  - коэффициент, учитывающий особенности взаимосвязи угловой и линейной скоростей при прокатке.

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

$$P = ui = wM = vF,$$

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

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

$$P_{ГП} = P_{ХХ} + P_{д} + P_{дин} + P_{T0} - P_{T1},$$

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

Одной из проблем рассматриваемого управления является проблема достаточно точного выделения мощности деформации прокатываемого материала  $P_{д} = P_{ГП} - P_{ХХ} - P_{дин} - P_{T0} + P_{T1}$ . Однако, мощность холостого хода валковой системы  $P_{ХХ}$  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  $P_0 = P_{ХХ} + P_{T0} - P_{T1}$ , можно вычислить мощность деформации  $P_{д}$ .

В процессе прокатки могут изменяться её некоторые технологические параметры (температура, жёсткость подката и т. п.) [4]. Поэтому целесообразна разработка адаптивной системы управления клетью, в которой, наряду с другими параметрами, уточняется значение  $P_{д}$ . Возможная структура адаптивной системы автоматического управления с регулированием по мощности главного привода клетки прокатного стана показана на рис. 3.

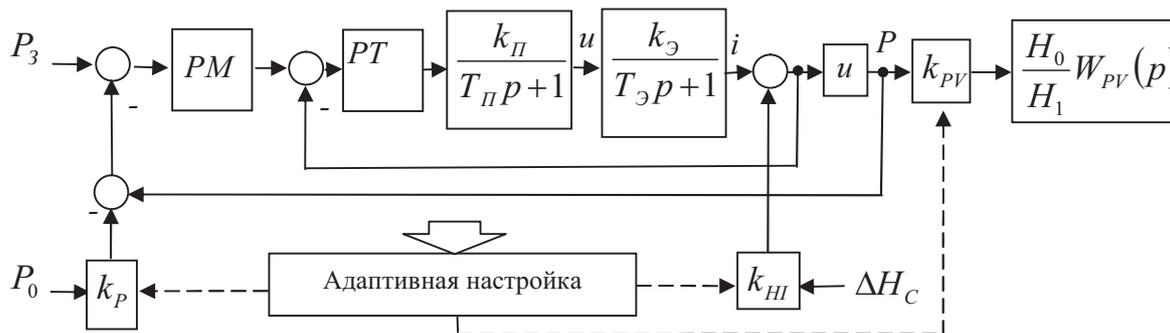


Рисунок 3 – Структура системы автоматического управления с регулированием мощности главного привода клетки прокатного стана

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

**Выводы.**

1. Основные трудности, создаваемые эксцентриситетом валков для автоматического регулирования толщины, определяются высокой частотой этого возмущения, а также тем, что разнотолщинность горячекатаной полосы содержит высокочастотную составляющую, определяемую эксцентриситетом валковой системы стана горячей прокатки.
2. Анализируя предлагаемые способы компенсации эксцентриситета можно выделить

два основных направления:

- экспериментальное определение эксцентриситета опорных валков путем проворачивания валков в состоянии «забоя» без металла в валках;
- определение эксцентриситета обоих опорных валков, включая их амплитуды и фазы, в процессе прокатки.

3. Установка датчиков углов поворота на опорных валках является достаточно сложной задачей, а эксплуатация этих датчиков требует специального обращения с ними.

4. С целью уменьшения количества клетей оснащённых системами компенсации биения валков, предлагается технологическая схема многоклетевого прокатного стана, в которой первая клетя является «жесткой» с поддержанием постоянной мощности деформации прокатываемого материала, все последующие клетки, кроме последней, «мягкими», обеспечивающими только требуемое обжатие металлического листа, а последняя «жесткой», наиболее точной, обеспечивающей требуемые показатели качества листопроката.

### Литература

1. Тимошенко Э.В., Самецкий А.А. Синтез систем управления параметрами полос при холодной прокатке. – К.: НВК «КІА», 1999. -264 с.

2. Борисов А.А., Мокрый Г.В, Батыр С.С. Управление прокатным станом как многосвязным объектом с переменным межклетевым запаздыванием // Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія: «Обчислювальна техніка та автоматизація». Випуск 112 (118). – Донецьк: ДонНТУ, – 2007. – С. 11-17.

3. Башарин А.В., Новиков В.А., Соколовский Г.Г. Управление электроприводами: Учебное пособие для вузов. – Л.: Энергоатомиздат. Ленинградское отделение, 1982 г. - 392 с.

4. Борисов А.А., Мокрый Г.В., Бойко В.В. Разработка алгоритмов управления прокатным станом на базе самоорганизации моделей управления и самоулучшения прогнозов // Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія: «Обчислювальна техніка та автоматизація». Випуск 113 (121) – Донецьк: ДонНТУ, – 2007. – С. 14–23.

Надійшла до редакції:  
31.01.2011

Рекомендовано до друку:  
д-р техн. наук, проф. Ткаченко В.М.

### Abstract

**Borisov A.A. Modelling fluctuations of rotation rolling cage roll and an estimation control system ways of its reduction.** In article the problem fluctuations of rotation rolling cage roll is analysed. Features of modelling fluctuations roll are considered. Known ways of indemnification fluctuations roll is compare. The control system with indemnification fluctuations is offered.

**Keywords:** palpation roll systems, fluctuation of rotation, the hydropress device, harmonic amplitude

### Анотація

**Борисов О.О. Моделирование эксцентриситета валков прокатной клети и оценка способов його зменшення САУ.** У статті проаналізована проблема эксцентриситету валків прокатної кліти. Розглянуто особливості моделювання биття валкової системи. Приведений порівняльний аналіз відомих способів компенсації эксцентриситету валків. Пропонується система управління з урахуванням биття валкової системи.

**Ключові слова:** биття валкової системи, эксцентриситет, гідронатискний пристрій, амплітуда гармоніки

© Борисов О.О., 2011