

УДК 621.771.2:681.513.6

А.А. Борисов (канд. техн. наук, доц.),
ГВУЗ «Донецкий национальный технический университет», г. Донецк
кафедра автоматики и телекоммуникаций
E-mail: a.a.bor@mail.ru

ПРИМЕНЕНИЕ FF-, FB-, MFC-AGC РЕГУЛЯТОРОВ В КОНЦЕПЦИИ УПРАВЛЕНИЯ ПРИВОДАМИ КЛЕТЕЙ ПРОКАТНОГО СТАНА ПО МОЩНОСТИ

Выполнен анализ целесообразности применения FF-AGC, FB-AGC, MFC-AGC регуляторов в системах регулирования процесса холодной листопрокатки при управлении главными приводами клеток прокатного стана по мощности. Рассмотрена концепция комбинированного управления толщиной листа по возмущению с помощью FF-AGC регулятора и межклетевым натяжением по отклонению с помощью FB-AGC регулятора. MFC-AGC регулятор используется как регулятор верхнего уровня, так как он наиболее полно охватывает динамику всего прокатного стана.

Ключевые слова: прокатный стан, гидравлическое нажимное устройство, математическая модель, давление, закон управления, передаточная функция.

Актуальность темы и общая постановка проблемы

Улучшение качественных параметров листопроката является одной из актуальнейших проблем металлургической промышленности. Реконструкция цехов непрерывной холодной прокатки листа с целью производства продукции, удовлетворяющей современным требованиям автомобильной, электротехнической и т.д. отраслей, позволит украинским предприятиям эффективно конкурировать с мировыми производителями. Получить качество металлического листа, которое удовлетворяло бы современным требованиям, без эффективной системы автоматического управления прокатным станом невозможно. Это, в первую очередь, связано с необходимостью согласования работы нескольких клеток, которые влияют одна на другую через металлическую полосу. Совершенствование математического описания непрерывной прокатки с точки зрения автоматизации, методов управления непрерывным станом и создание таких систем, которые, учитывая специфические особенности непрерывного стана, повышают эффективность его функционирования и качество производимой продукции, является важной научной задачей.

Одним из перспективных способов управления станами непрерывной холодной прокатки является регулированием по мощности главного привода. В [1] было рассмотрено, что мощность электродвигателя клетки может быть определена 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 - нагрузочный момент двигателя, v - линейная скорость проката, F - сила деформации металла. Мощность двигателя главного привода клетки прокатного стана определяют следующие составляющие: $P_{ГП} = P_{ХХ} + P_{Д} + P_{ДИН} + P_{Т0} - P_{Т1}$, 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, $P_{Т0}, P_{Т1}$ - мощности, обусловленные наличием натяжений проката соответственно до и после клетки.

Идея управления непрерывным станом заключается в поддержании в клетях соответствующих мощностей деформации прокатываемого материала $P_{Д}$ с целью

стабилизации толщины выхода проката за счёт максимального использования самовыравнивающих свойств многоклетевого непрерывного стана.

В системах автоматического управления прокатными станами получили широкое распространение FF-AGC, FB-AGC, MFC-AGC регуляторы. Их сравнительный анализ и соответствующие выводы о целесообразности применения в тех или иных локальных системах регулирования процесса листопрокатки являются актуальным направлением исследования при создании современной концепции управления многоклетевыми станами непрерывной холодной прокатки по мощности главных приводов.

Одной из проблем рассматриваемого управления является проблема достаточно точного выделения мощности деформации прокатываемого материала $P_d = P_{гп} - P_{хх} - P_{дин} - P_{T0} + P_{T1}$. Если мощность холостого хода валковой системы $P_{хх}$ практически является постоянной величиной и может быть измерена как мощность потребляемая ненагруженной клетью, $P_{дин}$ определяется моментом инерции валковой системы и также является известной величиной, то P_{T0}, P_{T1} , которые возможно вычислить на основе измерения соответствующих натяжений, могут вносить основную погрешность как внешние возмущения от соседних клеток. 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 практически не распространяется по всему стану. Было показано, что при увеличении толщины подката на входе в первую клеть, данную клеть целесообразно по определённому закону замедлять. Это позволяет стабилизировать скорость проката на выходе клетки и его натяжение между первой и второй клетью стана. Необходимо отметить, что у первой клетки практически отсутствует заднее натяжение листа (т.е. на её натяжение на её входе можно принять равным 0). Таким образом, P_{T0} для первой клетки можно не учитывать. Таким образом, в модели целесообразно учитывать только два переменных выходных параметра - толщину подката и натяжение между смежными клетями, т.е. она должна быть двухсвязной. Так как быстродействие контуров управления главными приводами как правило значительно ниже быстродействия контуров нажимных устройств, целесообразно

Постановка задач исследования

Для построения концепции системы автоматизированного управления непрерывным прокатным станом необходимо решить следующие основные задачи:

- разработать двусвязную модель клетки прокатного стана как объекта управления;
- проанализировать особенности применения FF-AGC, FB-AGC, MFC-AGC регуляторов в схемах локальных системах регулирования процесса листопрокатки;
- разработать методы управления прокатным станом исходя из вышеизложенных положений.

Решение задач и результаты исследований

Исходя из системного анализа процессов обжатия листа в клетки, соответствующая двумерная модель клетки, учитывающая, что при увеличении момента прокатки вследствие увеличения толщины подката скорость привода падает по определённому закону, соответствующему закону управления, предусматривающему определённое уменьшение скорости, и, наоборот, при уменьшении момента прокатки вследствие уменьшения толщины подката скорость привода возрастает по такому же закону, представлена на рис. 1. Здесь $K_{Hi}(p)$ - передаточная функция замкнутой системы управления нажимным устройством, $u_{Hi}(p)$ - значение управляющего сигнала на входе системы управления нажимным устройством, $K_{wi}(p)$ - передаточная функция замкнутой системы управления скоростью

двигателя главного привода, $u_{wi}(p)$ - задание на систему управления скоростью двигателя главного привода, $K_{Mi}(p)$ - передаточная функция двигателя главного привода по моменту нагрузки, $M_{Ci}(p)$ - момент нагрузки двигателя главного привода, R_i - радиус валков, k_H, k_M, k_T - подстраиваемые коэффициенты соответственно в каналах изменения толщины, момента прокатки и натяжения полосы, $\tau_i(p)$ - переменное межклетевое запаздывание, p - оператор Лапласа.

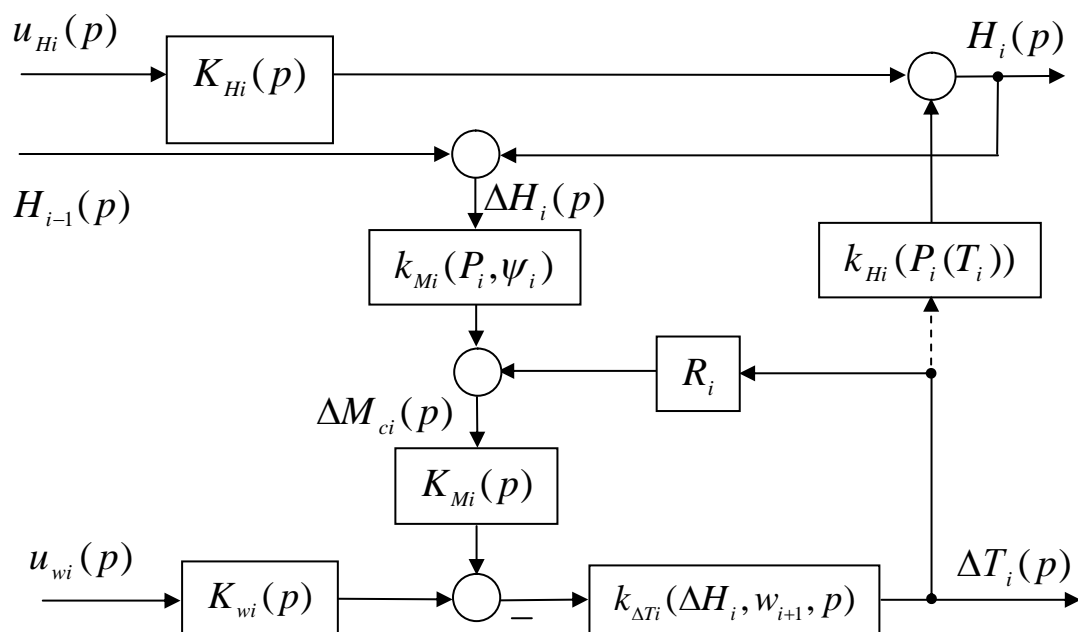


Рисунок 1 - Модель клетки прокатного стана как двусвязного объекта управления

Определены возможные способы управления двигателями главного привода прокатного стана:

- скорость двигателя каждой последующей клетки изменяется относительно скорости двигателя предыдущей клетки, а скорость первой клетки неизменна;
- в зависимости от толщины подката изменяется только скорость двигателя первой клетки, а скорости двигателей всех последующих клеток практически постоянны;
- относительно неизменна скорость какого-либо промежуточного двигателя главного привода, а скорости предыдущих и последующих двигателей удовлетворяют условию сплошности.

Выполнен анализ данных способов управления и показаны существенные преимущества второго из них:

- транспортное запаздывание в межклетевых промежутках, начиная со второй клетки, здесь в отличие от других способов практически инвариантно относительно возмущения толщины листа на входе стана, что позволяет достаточно просто реализовать систему компенсации эксцентриситета валков в смежных клетях;
- значительно упрощается задача верхнего уровня, так как возмущение толщины листа на входе стана не проходит в последующие клетки;
- значительно уменьшаются требования к динамическим характеристикам систем главного привода и нажимных устройств, начиная со второй клетки, что позволяет снизить стоимость технологического оборудования;

- повышается надёжность работы системы управления за счёт упрощения алгоритмов и уменьшения объёмов вычислений.

Таким образом, целесообразно максимально подавлять возмущения толщины входящего листа уже первой клетью стана, а не "исправлять" разнотолщинность во всех последующих клетях. В них достигается только требуемое обжатие листа и максимально используются самовыравнивающие свойства прокатного стана.

Анализ различных схем управления показал, что в данном случае для управления скоростью первой клетки наиболее эффективно применение FF-AGC регулятора по возмущению толщины поступающей в клетку полосы, действующего в функции показаний толщиномера перед клетью в сочетании с режимом "жёсткая клетка" системы управления гидронажимным устройством клетки. При этом необходимо обеспечить максимально эффективную компенсацию эксцентриситета валков, так как известно, что в режиме "жёсткая клетка" влияние эксцентриситета наиболее выражено. Также необходимо обеспечить компенсацию скоростного эффекта и других возмущений определяемых конкретной технологией производства. К конструктивным особенностям клетки при данном способе регулирования предъявляется требование минимального момента инерции валковой системы, так как именно этот параметр определяет максимальную величину мгновенной мощности требуемой для обеспечения необходимого быстродействия в контуре управления главным приводом. Таким образом минимизация момента инерции валковой системы позволяет уменьшить требования к пиковой мощности электрооборудования и определить ещё при проектировании меньшие ограничения.

Для стабилизации натяжения между первой и последующей клетью целесообразно использовать FB-AGC регулятор, так как он практически мгновенно реагирует на изменение натяжения, что невозможно при использовании данного регулятора для стабилизации толщины листа на выходе клетки с прямым её измерением. Таким образом, фактически целесообразно использовать комбинированное управление толщиной листа по возмущению и межклетевым натяжением по отклонению.

Исходя из вышеизложенного и модели на рис. 1, двусвязная модель первой клетки имеет вид:

$$\begin{cases} H_1(p) = K_{H1}(p)u_{H1}(p) - k_{H1}T_{1,2}(p); \\ w_1(p) = K_{w1}(p)u_{w1}(p); \\ pT_{1,2}(p) = k_{T1,2}(H_1(p)w_2 - H_0w_1(p)), \end{cases}$$

или

$$\begin{cases} H_1(p) = K_{H1}(p)u_{H1}(p) - k_{H1}T_{1,2}(p); \\ T_{1,2}(p) = \frac{k_{T1,2}w_2}{p} H_1(p) - \frac{k_{T1,2}H_0}{p} K_{w1}(p)u_{w1}(p). \end{cases}$$

Анализируя данную систему можно заметить, что толщина на выходе клетки зависит от натяжения листа, которое, в свою очередь зависит от скорости последующей клетки. Дальнейшее совершенствование динамической модели возможно путём учёта менее влияющих факторов на процесс прокатки.

Аналогичную модель целесообразно применить и для последней клетки многоклетевого стана, но с тем отличием, что здесь необходимо для стабилизации межклетевого натяжения с предыдущей клетью при увеличении толщины подката ускорять клетку. Конструктивно здесь также должна быть предусмотрена минимизация момента инерции валковой системы.

Промежуточные клетки обеспечивают только необходимое обжатие листа и, поэтому, никаких специфических требований к ним не предъявляется.

В параметрах состояния, с учётом упругих свойств трансмиссии от двигателя до прокатных валков [3], соответствующее матрично-векторное уравнение, описывающее промежуточные клетки, как объект управления по мощности имеет вид:

$$\begin{bmatrix} \dot{U}(t) \\ \dot{I}(t) \\ \dot{M}_C(t) \\ \dot{w}_D(t) \\ \dot{T}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{1}{T_\mu} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{1}{L} & -\frac{R}{L} & 0 & -\frac{C}{L} & 0 \\ 0 & \frac{\eta K_M}{J_D} & \frac{\eta}{J_D} - \frac{\eta}{J_B} & \chi & -\chi \\ 0 & \frac{K_M}{J_D} & -\frac{1}{J_B} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{1}{J_D} & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U(t) \\ I(t) \\ M_C(t) \\ w_D(t) \\ T(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{K_\Pi}{T_\mu} & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & \frac{\eta}{J_B} \\ 0 & 0 \\ 0 & -\frac{1}{J_B} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_w(t) \\ u_T(t) \end{bmatrix},$$

где K_M - конструктивная постоянная двигателя, K_Π, T_μ - соответственно коэффициент усиления и постоянная времени тиристорного преобразователя, J_D, J_B - моменты инерции двигателя и валковой системы (включая редуктор), χ - жёсткость упругого звена двигатель-валок, η - коэффициент вязкого трения в упругом звене.

Общая концепция предложенного управления для 4-х клетового прокатного стана представлена на рис. 2.

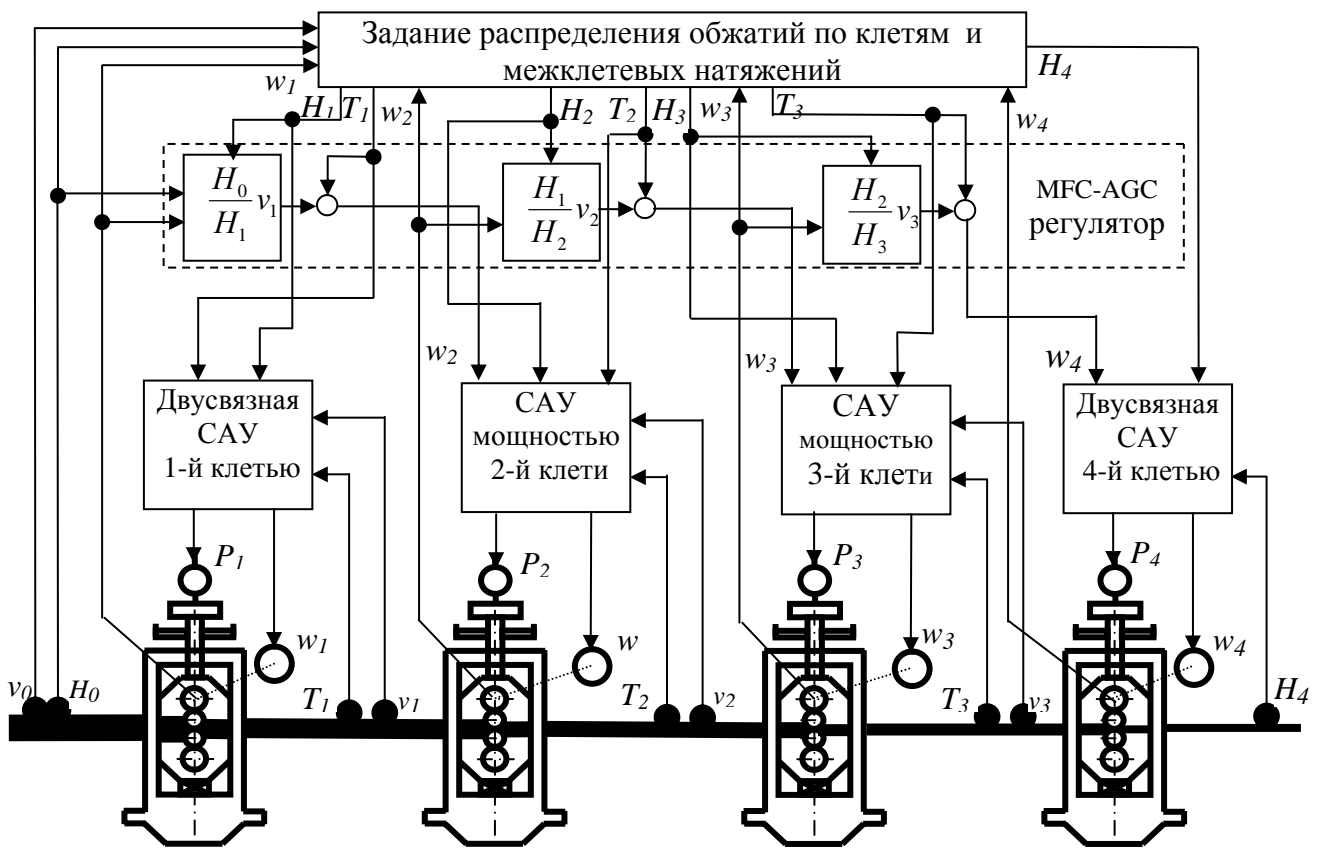


Рисунок 2 - Концепция управления 4-х клетевым станом по мощности

MFC-AGC регулятор в данной концепции управления целесообразно использовать как регулятор верхнего уровня, так как он наиболее полно охватывает динамику всего прокатного стана и является наиболее гибким. Данный закон регулирования может использоваться и в составе эталонной модели.

Моделирование динамики прокатного стана (рис. 3) с вышеизложенной концепцией управления показало соответствие его результатов положениям освещённым в данной работе. Из графиков видно, что наибольшим возмущениям подвержена первая клеть прокатного стана, а в остальных возмущения параметров значительно ниже.

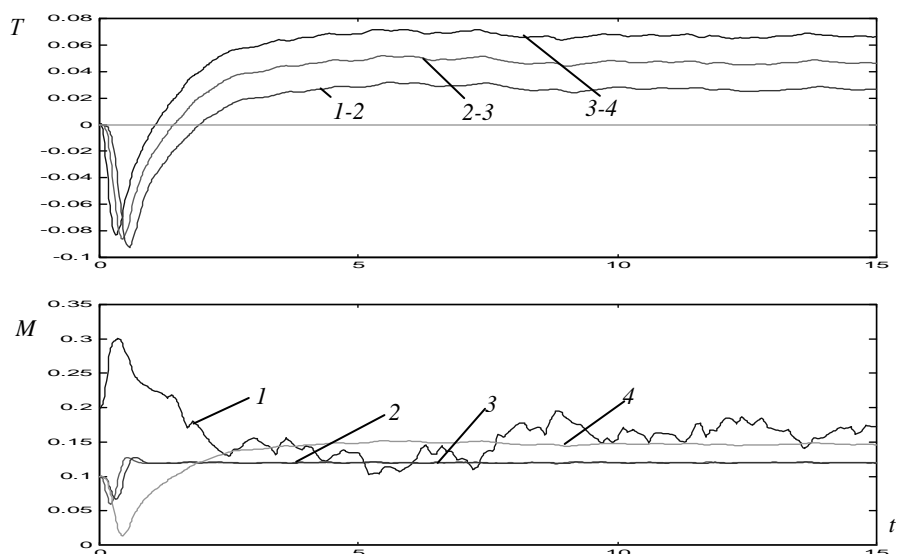


Рисунок 3 – Реакция моментов главных приводов M и межклетевых натяжений T на случайное изменение толщины подката 4-х клетевом прокатного стана

Выводы

1. Анализ различных схем управления показал, что при управлении по мощности главных приводов прокатного стана для первой клетки наиболее эффективно применение FF-AGC регулятора по возмущению толщины поступающей в клеть полосы, действующего в функции показаний толщиномера перед клетью в сочетании с режимом "жёсткая клеть" системы управления гидронажимным устройством клетки.

2. Для первой клетки необходимо обеспечить эффективную компенсацию эксцентриситета валков, так как известно, что в режиме "жёсткая клеть" влияние эксцентриситета наиболее выражено. Также необходимо обеспечить компенсацию скоростного эффекта и других возмущений определяемых конкретной технологией производства.

3. К конструктивным особенностям первой клетки при данном способе регулирования предъявляется требование минимального момента инерции валковой системы, так как именно этот параметр определяет максимальную величину мгновенной мощности требуемой для обеспечения необходимого быстродействия в контуре управления главным приводом. Таким образом минимизация момента инерции валковой системы позволяет уменьшить требования к пиковой мощности электрооборудования и определить при проектировании меньшие ограничения.

4. Для стабилизации натяжения между первой и последующей клетью целесообразно использовать FB-AGC регулятор, так как он практически мгновенно реагирует на изменение натяжения, что невозможно при использовании данного регулятора для стабилизации толщины листа на выходе клетки с прямым её измерением. Таким образом, фактически целесообразно использовать комбинированное управление толщиной листа по возмущению и межклетевым натяжением по отклонению.

5. MFC-AGC регулятор в данной концепции управления целесообразно использовать как регулятор верхнего уровня, так как он наиболее полно охватывает динамику всего

прокатного стана и является наиболее гибким. Данный закон регулирования может использоваться и в составе эталонной модели.

6. Модель управления аналогичную первой клетки целесообразно применить и для последней клетки многоклетевого стана, но с тем отличием, что здесь необходимо для стабилизации межклетевого натяжения с предыдущей клетью при увеличении толщины подката ускорять клеть. Конструктивно здесь также должна быть предусмотрена минимизация момента инерции валковой системы.

Список использованной литературы

1. Борисов А.А. Разработка двумерной системы управления клетью непрерывного листопрокатного стана // Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія: Електротехніка та енергетика. Випуск 67. – Донецьк: ДонНТУ, – 2003. – С. 195–198.
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. Тимошенко Э.В., Самецкий А.А. Синтез систем управления параметрами полос при холодной прокатке. – К.: НВК «КИА», 1999. -264 с.
5. Чернышев Н.Н. Синтез компенсаторов для комбинированных систем автоматического регулирования // Збірник наукових праць ДонІЗТ. Серія: «Автоматика, телемеханіка, зв'язок» Випуск 32. – 2012. – С. 52-56.
6. Жукова Н.В., Литвинов В.И., Голиков В.В. Линейный асинхронный регулируемый электропривод с возможностью измерения электромагнитного момента // Київ: Видавництво КНУХТ, Автоматика-2012, - С. 179-180.

References

1. Borisov, A.A. (2003), *Razrabotka dvumernoy sistemy upravleniya kletiy nepreryvnogo listoprokatnogo stana*, DonNTU, Donetsk, vol. 67, pp. 195-198.
2. Borisov, A.A., Mokry, G.V. and Batyr, S.S. (2007), *Upravleniye prokatnym stanom kak mhogosvyaznym obektom s peremennym mejkletevym zapazdyvaniem*, DonNTU, Donetsk, vol. 112(118), pp. 11-17.
3. Basharin, A.V., Novikov, V.A. and Sokolovskij, G.G. (1982), *Upravlenie jelektroprivodami*, Jenergoizdat, Leningrad, USSR.
4. Timoshenko, E.V. and Sametskiy A.A. (1999), *Sintez sistem uprauleniya parametrami polos pri holodnoy prokatke*, NVK "KIA", Kiev.
5. Chernyshev, N. N. *Sintez kompensatorov dlya kombinirovannyh sistem avtomaticheskogo regulirovaniya*, DonIZT, Donetsk, vol. 32, pp. 52-56.
6. Zhukova, N.V., Litvinov, V.I., Golikov V.V. (2012) *Lineiny asinhronny reguliruemy elektroprivod s vozmojnostyu izmereniya elektromagnitnogo momenta*, Kiev, pp. 179-180.

Надійшла до редакції:
22.04.2014 р.

Рецензент:
докт. техн. наук, проф. Ткаченко В.М.

О.О. Борисов

ДВНЗ «Донецкий национальный технический университет»

Застосування FF-, FB-, MFC- AGC регуляторів в концепції управління приводами клітей прокатного стану за потужністю. Виконано аналіз доцільності застосування FF- AGC, FB- AGC, MFC-AGC регуляторів у системах регулювання процесу холодної лістопрокатки при управлінні головними приводами клітей прокатного стану за потужністю. Розглянуто концепцію комбінованого управління товщиною листа за збуренням за допомогою FF-AGC регулятора і межклетевим натягом по відхиленню за допомогою FB-AGC регулятора. MFC-AGC регулятор використовується як регулятор верхнього рівня, тому що він найбільш повно охоплює динаміку всього прокатного стану.

Ключові слова: прокатний стан, гідравлічне нажимное пристрій, математична модель, тиск, закон управління, передавальна функція.

A.A. Borisov

Donetsk National Technical University

Application FF-, FB-, MFC-AGC regulators concept actuator rolling stands for power. Analysis of different control schemes rolling mill showed that the management of power for the main drives of the first stand of the most effective application of FF-AGC control of the perturbation thickness entering the cage strip acting as a function of the gauge readings before the cage in combination with the " rigid cage " control system gidronazhimmym device stand. For the first stand is necessary to provide effective compensation of the eccentricity of the rolls , since it is known that in the " rigid cage " effect is most pronounced eccentricity. Also need to provide compensation for the effect of speed and other disturbances defined by a particular production technology. The design principle of the first stand in this method are required regulatory minimum moment of inertia of the roll system , since this parameter determines the maximum value of the instantaneous power required to provide the required performance in the main drive control circuit. Thus minimizing the moment of inertia of the roller allows to reduce the peak power requirements of the electrical equipment and to determine the design lower limit. To stabilize the tension between the first and further advisable to use cage FB-AGC controller because it reacts almost instantaneously to changes in the tension that is not possible using current control for stabilization of the plate thickness at the outlet of its cage direct measurement. So actually it is advisable to use combined control sheet thickness of the perturbation and interstand tension by the deviation. MFC-AGC controller in the control concept is expedient to use as a top-level controller, since it is most likely fully encompasses the dynamics of the rolling mill is the most flexible. This control law can be used as part of the reference model. Management model similar to the first stand is advisable to apply for the last stand multistand camp, but with the difference that here it is necessary to stabilize the tension from the previous interstand cage with increasing thickness tackle accelerate the crate. Structurally, there must also be provided for minimizing the inertia of the roller.

Keywords: rolling mill, hydraulic pressure device, a mathematical model, the pressure control law, the transfer function.



Борисов Александр Алексеевич, Украина, закончил Донецкий политехнический институт, Донецкую государственную академию управления, канд. тех. наук, доцент кафедры автоматизации и телекоммуникаций ГВУЗ «Донецкий национальный технический университет» (ул. Артема, 58, г. Донецк, 83001, Украина). Основные направления научной деятельности – автоматическое управление сложными технологическими процессами, идентификация систем, совершенствование устройств автоматизации.