

УПРАВЛЕНИЕ ПРОКАТНЫМ СТАНОМ КАК МНОГОСВЯЗНЫМ ОБЪЕКТОМ С ПЕРЕМЕННЫМ МЕЖКЛЕТЕВЫМ ЗАПАЗДЫВАНИЕМ

Борисов А.А., Мокрый Г.В., Батыр С.С.

Донецкий национальный технический университет, г. Донецк

кафедра автоматике и телекоммуникаций

кафедра автоматизированных систем управления

E-mail: alexbor@fcita.dn.ua

Abstract

Borisov A.A., Mokry G.V., Batyr S.S. Control of the rolling mill as by multicoherent object with variable by delay. In the article the ways of control are justified and the algorithms of optimum control of a roll mill stand as by bivariate object are reviewed. In view of decomposition of the process on technological units the three-level system of automatic control of a continuous mill with standard local control systems of screw-down structures and electric motors of a main occasion on a lower layer, two-connected adaptive control systems local cages at the second level, and offered multivariable regulator on a top level is developed. The system takes into account nonlinearity of the control object and variable delay.

Актуальность проблемы и цель исследования. Применяющиеся в настоящее время системы регулирования толщин и натяжений полосы с типовыми П-, ПИ- и ПИД-регуляторами уже не удовлетворяют современным требованиям, т.к. раздельное управление в каналах регулирования толщины и натяжения не обеспечивает оптимальный режим работы стана как многосвязного объекта. С другой стороны, синтез многомерной системы управления прокатным производством сопряжён с трудностями связанными с большой размерностью, многосвязностью, нелинейностью данного объекта управления и наличием в нём переменного запаздывания. Тем не менее, конкурентоспособность отечественной прокатной продукции сегодня в большой степени зависит от качества автоматизации технологических процессов, поэтому совершенствование систем автоматического управления непрерывной прокаткой на базе оптимизации алгоритмов управления является существенным резервом в обеспечении наивысших технико-экономических показателей листопрокатного производства, выражающихся в обеспечении максимальной производительности стана при минимальной энергоёмкости процесса и заданных параметрах качества листа. Понимая этот факт, в настоящее время руководство большинства металлургических заводов Украины осуществляет реконструкцию технологических линий прокатного производства с привлечением ведущих зарубежных фирм. Однако услуги иностранных специалистов в интеллектуальной сфере достаточно дороги. Поэтому, проблема создания и внедрения собственных новых разработок в этой области сегодня для Украины является актуальной.

Цель данной работы – обоснование методов и разработка структуры системы управления непрерывным прокатным станом.

Анализ публикаций и исследований в данной области. Анализ работ в области управления прокатным производством показал, что в части автоматизации непрерывного стана на базе современных компьютерных технологий существуют определённые проблемы, отмеченные в [1]. Многосвязные модели и методы автоматизации, предложенные в последних десятилетиях прошлого столетия и основанные на подходах достаточно полно изложенных в [2], уже не удовлетворяют современным требованиям. Возможные причины такого состояния вопроса рассматривались в [1,3]. В [3,4] было показано, что межклетевое запаздывание в стане, которое определяется как отношение межклетевого расстояния к скорости полосы на выходе из предшествующей клетки, является переменной величиной.

Также в [3,4] была предложена новая многосвязная модель непрерывного стана и рассмотрены основы управления прокаткой как многомерным нелинейным объектом с пере-

менным запаздыванием. Настоящая статья является дальнейшим развитием данного направления и основана на результатах исследований изложенных в [3,4].

Постановка задачи. Для построения комплексной системы автоматизированного управления непрерывным прокатным станом необходимо решить следующие основные задачи:

- проанализировать возможность синтеза системы управления прокатным станом с N клетями, для которой применимо оптимальное управление в линейной постановке задачи и оценка состояния (то есть фильтр Калмана). В этом случае оптимальный алгоритм можно свести к рекуррентной оценке с постоянным коэффициентом усиления и формированию закона управления как линейной функции предсказанного состояния (модифицированный предсказатель Смита). Тогда линейная постановка задачи для динамической системы с переменными параметрами будет следующая: на базе набора прошлых измерений и управлений, а также возможных характеристик процесса, определить оптимальное управление, удовлетворяющее заданному критерию качества.

- разработать методы управления прокатным станом и структуру программного обеспечения САУ.

Решение задач и результаты исследований. Для прокатного стана как объекта с переменным межклетевым запаздыванием управление обжатием в клетях является задачей нахождения таких входных воздействий $u_{Hi}(t)$, при которых объект может переходить из одного заданного состояния в другое. Отсюда возникает необходимость в четком определении понятия управляемости объекта управления. Если в обычной динамической системе ее состояние в данный момент времени t_1 целиком определяется состоянием $H(t_0)$ в предшествующий момент времени t_0 и отрезком входного управляющего воздействия $u_{Hi}[t_0, t_1]$, то в системе с запаздыванием в качестве еще одного элемента управления должна задаваться начальная функция на отрезке времени $[t_0 - \tau(t_0), t_0]$.

Это обстоятельство существенным образом усложняет задачу определения управляемости системы и обеспечения необходимой робастности. Дело в том, что пространством управлений такой системы является множество упорядоченных пар допустимых входных воздействий $u_{Hi}(t)$ и допустимых значений начальных функций $H_0(t)$. Для управления объектом с запаздыванием необходимо найти такое кусочно-непрерывное управление $u_{Hi}(t)$, которое обеспечит переход системы с состояния $H(t_0)$ в состояние $H(t_1)$ при заданном значении функции $H_0(t)$. При этом основная трудность состоит в том, что для возможности дальнейшего управления, с момента времени t_1 и дальше, необходимо знать значение функции $H(t)$ на отрезке времени $[t_1 - \tau(t_0), t_1]$, которое играет роль новой начальной функции $H_1(t)$.

Это означает, что управление нажимным устройством $u_1(t)$ должно быть таким, чтобы обеспечить при заданной начальной функции $H_0(t)$ заданное значение толщины полосы $H(t_1)$ в точке t_1 и заданный отрезок функции $H(t) = H_1(t)$. На следующем отрезке времени ищется управление нажимного устройства $u_2(t)$ при заданной начальной функции толщины полосы $H_1(t)$. Таким образом, при указанных условиях можно обеспечить непрерывность управления. Такое регулирование относится к задаче управления системой с памятью.

Синтез регулятора для объекта с переменным запаздыванием, который описывается уравнениями

$$\begin{aligned} \dot{X}(t) &= A(t)X(t) + B(t)X(t - \tau(t)), \\ Y(t) &= C(t)X(t), \quad t \geq t_0, \end{aligned} \quad (1)$$

с начальной функцией $H_0(t)$, определенной на отрезке времени $[t_0 - \tau(t_0), t_0]$, требует предварительного рассмотрения вопроса наблюдаемости системы. Можно показать, что система будет наблюдаемой на отрезке времени $[t_0, t_1]$, тогда и только тогда, когда матрицы $B(t)$ и $C(t)$ будут иметь ранг равный числу строк вектора $H_0(t)$.

Способностью к управлению неминимально-фазовыми и неустановившимися в разомкнутом состоянии системами, в частности, системами с неполностью известными величинами транспортного запаздывания обладает обобщенное прогнозирующее управление. Критерий оптимальности при таком регулировании – минимизация дисперсии исходного

процесса $y(t)$ по всем моментам дискретного времени t . Сначала прогнозируется величина исходного процесса на j шагов вперед - $y(t+j)$, потом текущая величина управляющего воздействия $u(t)$ устанавливается таким образом, чтобы сделать этот выход нулевым.

Для удовлетворения этим требованиям используется критерий оптимальности следующего вида:

$$j(u, t) = E \left[\sum_{j=N1}^{N2} (y(t+j) - r(t+j))^2 + \sum_{j=1}^{NU} \lambda_1(j) (\Delta u(t+j-1))^2 \right]. \quad (2)$$

Здесь $E[\bullet]$ - математическое ожидание, $r(t+j)$ - уставка, λ_1 - весовой коэффициент, $\Delta u(t)$ - увеличение управляющего воздействия в системе.

В момент времени t критерий минимизируется относительно разности $\Delta u(t)$, NU - горизонт управления, $N1$ - минимальный горизонт качества, $N2$ - максимальный горизонт качества, $\lambda_1(j)$ - последовательность весовых коэффициентов управления. Добавление ограничения на увеличение управляющего воздействия можно интерпретировать как назначения бесконечных весовых коэффициентов на изменение этого влияния через некоторое время. Это, в свою очередь, не только обеспечивает быстрое достижение контроллером своей цели и стабилизацию неминимально-фазового объекта управления, но и снижает затраты времени, связанные с вычислениями. Правильный выбор весовых коэффициентов управления и горизонтов стоимости обеспечивает также достижение хороших показателей качества и асимптотической устойчивости замкнутой системы для систем, устойчивых в разомкнутом состоянии. Использование инкрементных входных сигналов обеспечивает появление нулевой статической ошибки при ненулевом постоянном опорном сигнале. Однако использование инкрементного управления затрудняет установление точно определенных границ величины $u(t)$. В результате она может достичь очень больших величин. Чтобы предотвратить такое увеличение и при этом сохранить дисперсию как можно меньшей, необходимо при обеспечении устойчивости замкнутой системы поддерживать довольно маленькое значение весового коэффициента λ_1 . Таким образом, весовой коэффициент увеличения управляющего воздействия λ_1 , включается в окончательное выражение только для ограничения управляющего сигнала. Процедура минимизации выполняется на нескольких $(N2-N1+1)$ будущих значениях выхода с учетом нескольких (NU) будущих инкрементных управляющих воздействий. Результат алгоритма в некоторой степени зависит от того, входит ли соответствующее действительности запаздывание в интервал между величинами $N1$ и $N2$. Обычное значение величины $N1$ выбирается равным значению времени запаздывания. В процедуре минимизации используется также концепция управления по горизонту, который отдалается, в которой управляющие воздействия $\Delta u(t), \Delta u(t+1), \dots, \Delta u(t+NU-1)$ выбираются, но фактически применяется только значение $\Delta u(t)$. В момент $t+1$ решается новая задача минимизации. Управление по такому критерию обеспечивает как приемлемые показатели качества, так и асимптотическую устойчивость разработанных систем управления, однако остаются вопросы, связанные с необходимостью линеаризации многосвязного объекта управления, о целесообразности которой отмечалось в предшествующих разделах.

Поэтому, наиболее рациональным представляется подход к проблеме, когда задача управления прокатным станом разбивается на части: нелинейную задачу согласования скоростей двигателей главных приводов, задачу нахождения переменных запаздываний в системе и задачу оптимального управления клетями как двусвязными линейными объектами управления.

Структура системы, реализующей данный принцип, представлена на рис.1. Обоснование алгоритма управления нелинейного регулятора и синтез двусвязной системы управления клетью были рассмотрены в [3,4]. Поэтому, далее рассмотрим только задачу определения величин переменных запаздываний в стане.

Обозначим запаздывания которые необходимо учитывать в системе управления (рис.2): прежде всего это запаздывания обусловленные скоростью прокатки v и расстояния-

ми s_{12}, s_{23}, s_{34} между смежными клетями, то есть технологией непрерывной прокатки, а также расстояниями s_0, s_1, s_2, s_3, s_4 до устройств получения информации о параметрах процесса (то есть датчиков). Расстояния между клетями и до датчиков являются постоянными во времени величинами и известны из конструкции стана. Таким образом, запаздывания определяются переменными линейными скоростями отдельных сегментов проката, которые зависят от угловых скоростей двигателей главных приводов. Наиболее качественную оценку величин запаздываний можно получить, измеряя линейные скорости проката во всех межклетевых промежутках и на входе первой клетки:

$$\tau(t) = \frac{s}{v(t)}$$

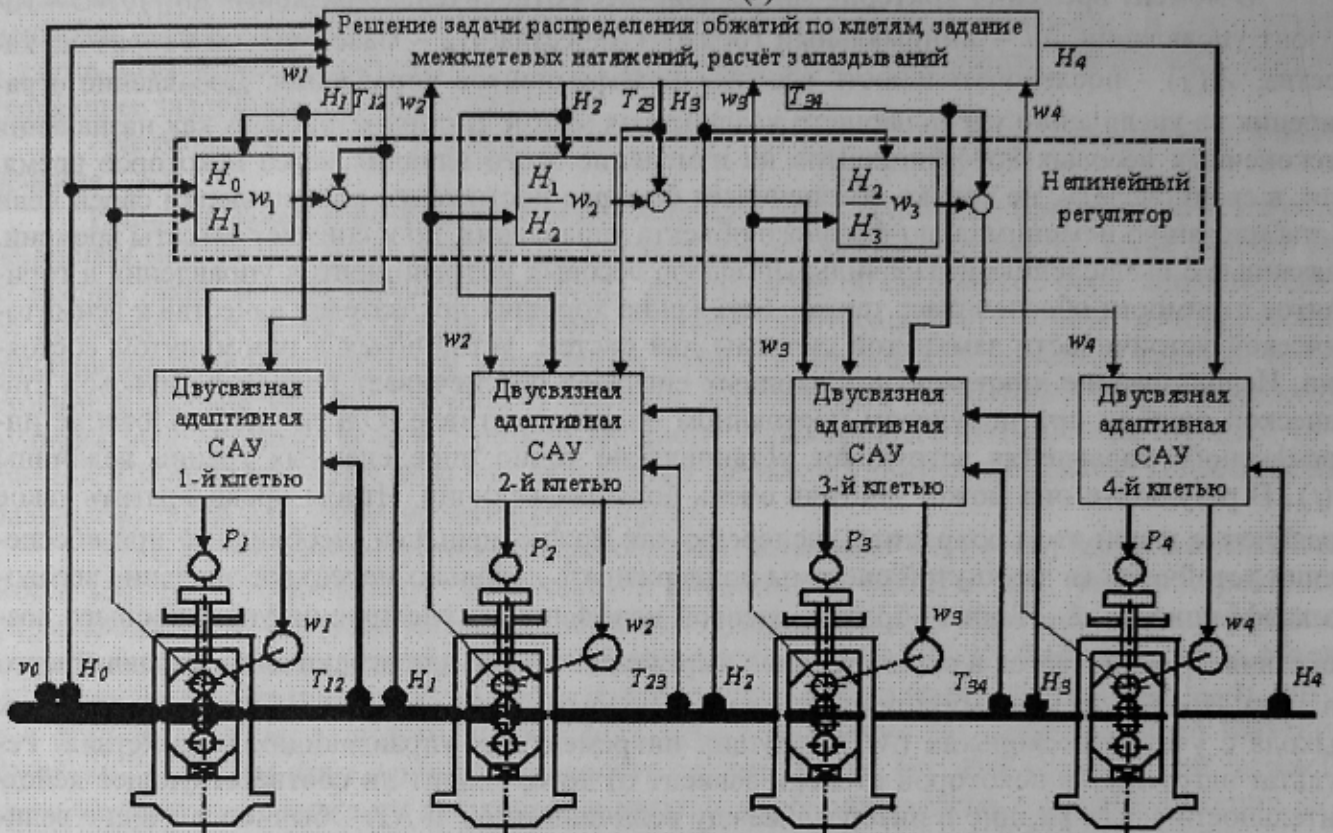


Рисунок 1 - Структура многосвязной САУ прокатным станом

Датчики линейной скорости имеют простую конструкцию и надежны в эксплуатации. Кроме того, целесообразно конструктивное объединение датчика скорости и датчика натяжения, если они имеют близкие структуры конструкций. Более того, на основании информации о мгновенном значении толщины подката на входе стана и линейных скоростей проката в конкретных точках можно получить довольно точную информацию о всех его толщинах также в конкретных точках. Действительно, из закона сплошности

$$H_1 = \frac{v_0}{v_1} H_0; \quad H_2 = \frac{v_1}{v_2} H_1; \quad H_3 = \frac{v_2}{v_3} H_2; \quad H_4 = \frac{v_3}{v_4} H_3. \quad (3)$$

Информацию о линейных скоростях проката можно получить и на основании измерений угловых скоростей валков, однако расчет абсолютной зависимости линейной скорости проката от угловой скорости валка довольно сложен, поэтому, целесообразнее использовать измерение линейной скорости хотя бы подката первой клетки и относительные зависимости по всему стану.

На рис.2 представлена структура блока расчета запаздываний в стане и определения линейных скоростей, которая использует данный принцип ($t_{рз}$ - время решения задачи распределения обжатий). Используя взаимосвязи (3) возможно переключение датчиков линейной скорости и более точных, но и более дорогих, датчиков толщины металлического листа.

Если измерение линейной скорости подката даже первой клетки не осуществляется, то его необходимо рассчитать на основании угловой скорости валка на соответствующей модели. При этом возникают вопросы динамической оптимизации и самосовершенствования подобных моделей.

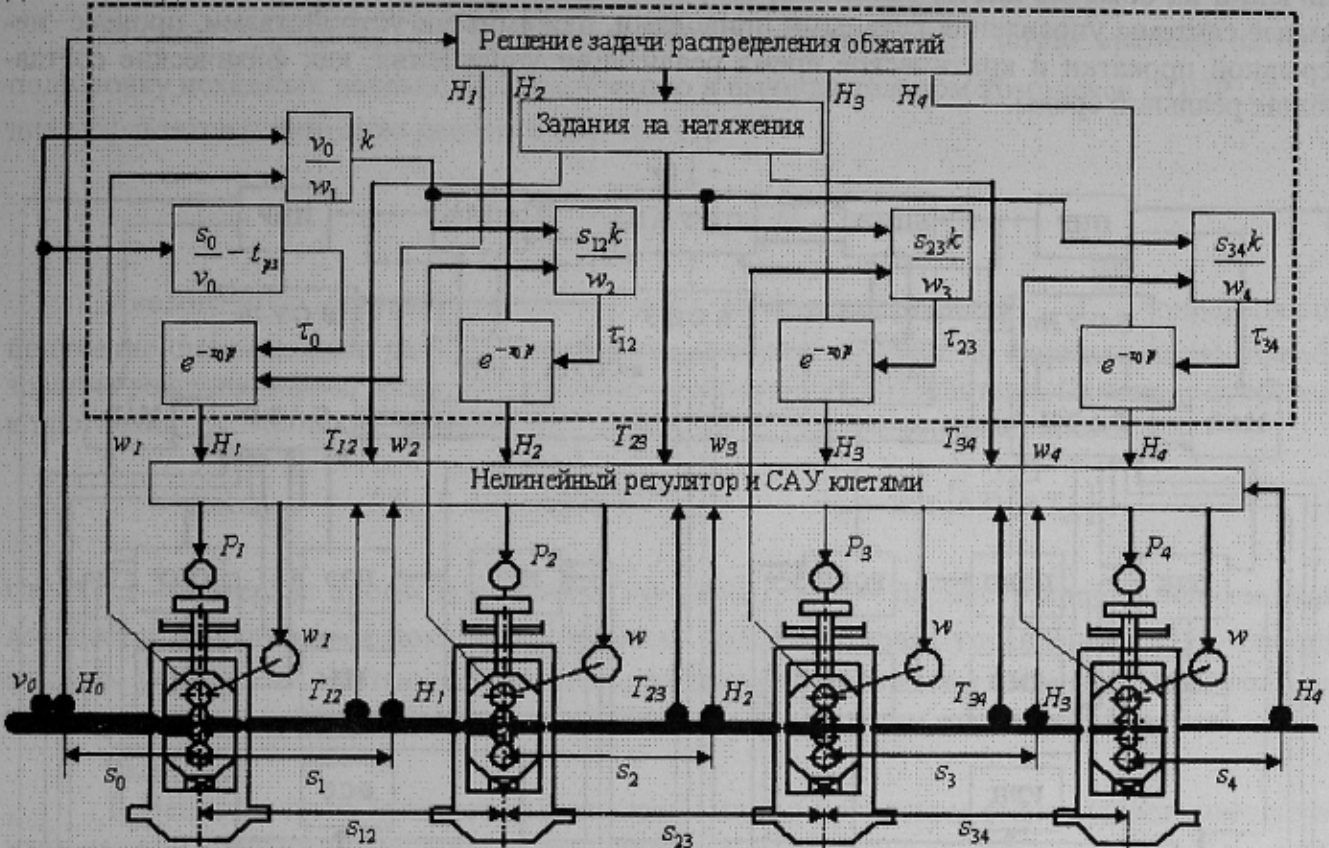


Рисунок 2 - Структура САУ с учётом переменного запаздывания

Структура математического обеспечения приведена на рис.3. Она построена по иерархическому принципу и состоит из двух частей, охватывающих весь процесс прокатки.

Левая часть структуры соответствует периоду моделирования и прогнозирования, правая – периоду управления.

Верхний уровень, общий для обеих частей, включает систему СОУПП оперативного управления процессом прокатки, блоки ППП и ОПП прогнозирования и оценки процесса прокатки, блоки БППР1 и БППР2 поддержки принимаемых решений на верхнем уровне, модели МРИК и МОРО оптимального распределения скоростей главных приводов и обжатий по клетям, блок БОЦУ оценки и прогнозирования цикла управления верхнего уровня.

Нижний уровень представлен блоками БОУК1 – БОУКк оперативного управления клетями (по числу клеток). Блок БОУК объединяет две части для управления фазой формирования модели управления и фазой управления. Фаза формирования модели управления (левая часть рис.3) включает: блок БАПП анализа параметров процесса прокатки, блок МАР1 ассоциативного выбора решений по коррекции процесса, блок ОЦК оценки цикла коррекции процесса, блок ПЭУ выработки обобщенного показателя эффективности управления процессом, блок РООУ реальной оценки оптимальности управления, эталонные модели МРС, МРО и МОР требуемых распределений скоростей главных приводов, обжатий по клетям и выполнения требуемого объема вычислений в соответствии с вычислительной производительностью компьютера, блоки МГП, МНУ, МОУ, КВП отражающие в схеме модели локальных систем управления главными приводами, нажимными устройствами, непосредственно объект управления, т.е. сам процесс, и критическое время моделирования, как математические составляющие моделируемой среды.

Правая часть структуры управления прокаткой включает: блок БАЭПС анализа эксплуатации прокатного стана, модель МАР2 ассоциативных решений, блок ОЦУ определения

цикла управления станом, блок ПЭЭ выработки показателя эффективности эксплуатации стана, блок РОЭ реальной оценки эксплуатации, эталонные модели МТР, МЗ и МО формирования требуемых производственных ресурсов, расходов (затрат) энергии по клетям и ограничений на обжатие листа, блоки ГП, НУ, ПП, ФСС, отражающие в схеме реальные локальные системы управления главными приводами, нажимными устройствами, процесс непрерывной прокатки и критическое время реализации управления, как физические составляющие реальной среды.

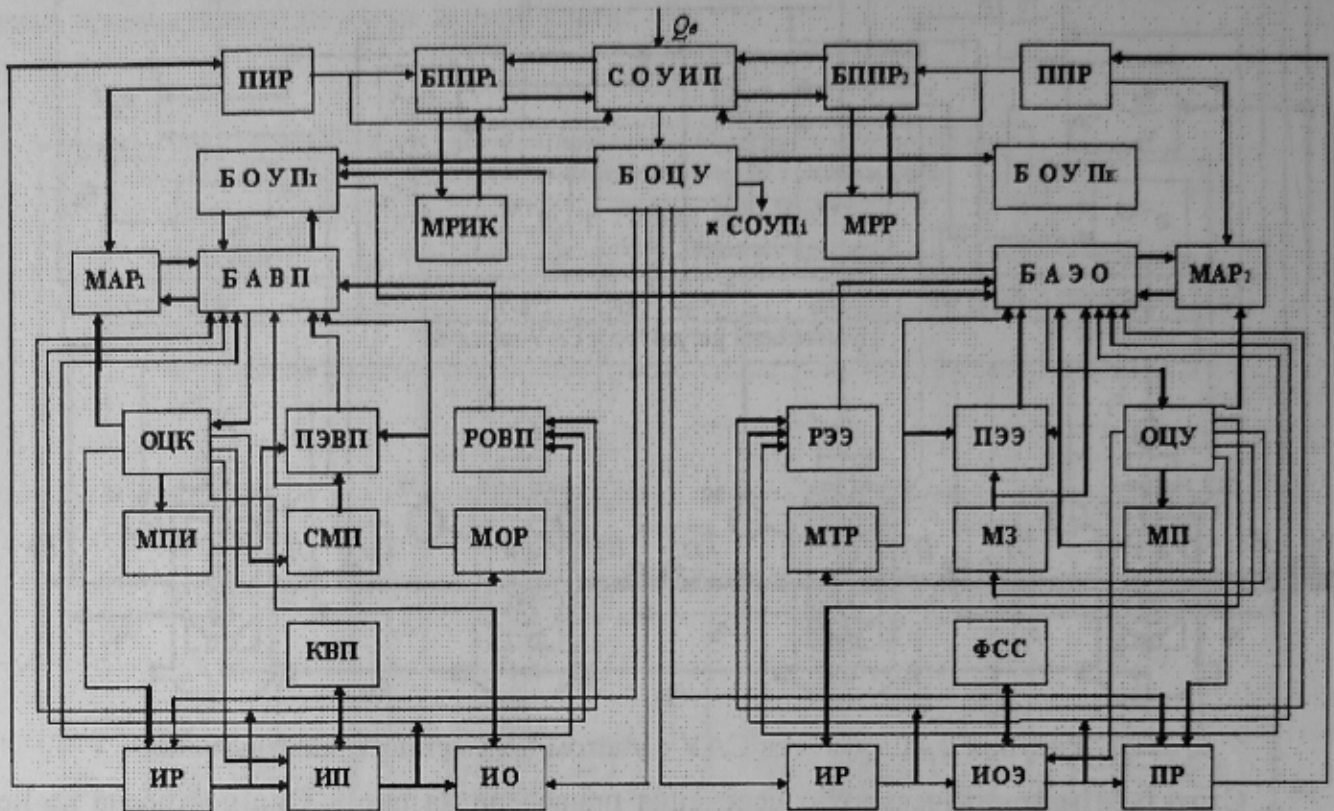


Рисунок 3 - Структура программного обеспечения иерархической системы управления прокатным станом

Алгоритм функционирования верхнего уровня заключается в следующем:

- в соответствии со стратегией управления, энергетическими возможностями X_s и количеством клетей, формулируются ограничения на обжатия и с учетом прогнозов развития динамики изменения параметров процесса ставится задача оптимизации распределения обжатий и скоростей главных приводов по клетям (СОУПП);
- весь период управления разбивается на этапы (шаги), соответствующие циклу управления;
- формулируются целевые функции на текущем j -м шаге ($j = \overline{1, m}$, m - число шагов) оптимизации и на весь цикл управления (СОУПП, БППР, МОРС);
- решается задача динамического программирования на интервале ΔT (БППР, МОРС).
- устанавливается интервал прогнозирования $\Delta T_{\text{п}}$ и производится прогноз изменения основных параметров процесса прокатки (ППП, ОПП);
- по прогнозам с учетом требований оперативности управления при выборе варианта, выработке решения и коррекции процесса листопрокатки рассчитывается цикл управления (БОЦУ):

$$T_{\text{л}} = T_{\text{л}^{\text{во}}} + T_{\text{л}^{\text{к}}} + T_{\text{л}^{\text{в}}}, \tag{4}$$

где

$T_{\text{цв}}$ - время выработки варианта,

$T_{\text{цз}}$ - время решения задач,

$T_{\text{цк}}$ - время цикла реализации управления (коррекции).

В свою очередь $T_{\text{цв}}, T_{\text{цз}}, T_{\text{цк}}$ складається из составляющих затрат времени на сбор и подготовку исходных данных Δt_1 , реализацию в вычислительном комплексе СППР Δt_2 , анализ результатов и принятие решения Δt_3 , так что

$$T_{\text{цв}} = \Delta t_1 + \Delta t_2 + \Delta t_3. \quad (5)$$

Аналогичную структуру составляющих имеют величины $T_{\text{цз}}, T_{\text{цк}}$, определяющие получение оптимального решения задачи для принятого варианта, формализацию, преобразование решения в физически реализуемые управляющие воздействия. Основное требование к прогнозируемому циклу управления – выполнение условия оперативности:

$$\Delta T_{\text{п}} \geq \Delta T_{\text{р}}; \Delta T \leq \Delta T_{\text{по}}; \quad T_{\text{ц}} = \min[\Delta T_{\text{р}}, \Delta T_{\text{по}}], \quad (6)$$

где $\Delta T_{\text{п}}$ — интервал прогноза динамики процесса, $\Delta T_{\text{р}}$ — параметр инерционности наиболее быстро меняющегося показателя прокатки, ΔT — интервал управления, $\Delta T_{\text{по}}$ — инерционность управления клетью. Выполнение условия (6) позволяет оперативно учитывать и адаптироваться к наиболее быстро изменяющимся показателям листопрокатки.

Выводы:

1. Непостоянство межклетевых запаздываний в прокатном стане существенно усложняет задачу определения управляемости системы.
2. При использовании обобщенного прогнозирующего управления остаются вопросы целесообразности линеаризации объекта управления.
3. Предложен подход к проблеме, когда задача управления прокатным станом разбивается на части: нелинейную задачу согласования скоростей двигателей главных приводов, задачу нахождения переменных запаздываний в системе и задачу оптимального управления клетями как двусвязными линейными объектами управления.

Литература

1. Бессараб В.І., Борисов О.О. Проблеми автоматизації процесу холодної листопрокатки // Наукові праці ДонНТУ. Серія: Обчислювальна техніка та автоматизація, випуск 38. - Донецьк: ДонНТУ, 2002. - С.7-12.
2. Дружинин Н.Н. Непрерывные станы как объект автоматизации. – М.: Металлургия, 1975. -336 с.
3. Борисов А.А., Мокрый Г.В. Математическая модель процесса непрерывной листопрокатки как объекта управления // Наукові праці ДонНТУ. Серія: Обчислювальна техніка та автоматизація, випуск 48. - Донецьк: ДонНТУ, 2002. - С. 92-100.
4. Борисов О.О., Попов В.О. Моделювання безперервного стану і основи управління ним як багатозв'язним об'єктом // Наукові праці ДонНТУ. Серія: Обчислювальна техніка та автоматизація, випуск 64. - Донецьк: ДонНТУ, 2003. - С. 31-37.