

ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ В ИНТЕГРИРОВАННОМ УПРАВЛЕНИИ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИМИ КОМПЛЕКСАМИ

**А. Л. Генкин, С. А. Власов, С. В. Кравцов,
Н. Г. Волочек, И. В. Никулина (Москва)**

В Институте проблем управления РАН для решения задач управления интегрированными АСУТП металлургического производства разработана [1] имитационная система, охватывающая участки металлургического производства от выплавки и разлива стали до прокатки на листовых и сортовых станах (с различными технологическими схемами и составами оборудования). Для синтеза системы разработаны специальная методика имитационного моделирования и принципы формирования имитационных систем, ориентированные на решение задач анализа и синтеза вариантов автоматизированных технологических комплексов (АТК) современного металлургического производства.

В составе имитационной системы имеются модули, содержащие модели и алгоритмы функционирования САМ и САРР-систем участков производства и алгоритмы интеграции их компонентов между собой [2].

При традиционном подходе имитационная модель рассматривается как некоторый алгоритм, вычислительный процесс которого моделирует работу исследуемой системы. Рассматривая имитационную модель как «черный ящик», ее можно представить в виде тройки $\langle X, Y, P \rangle$, где X и Y – вход и выход модели; P – параметры модели. Для изменения варианта моделируемой системы (или варианта имитационной системы) необходимо изменить значения параметров P . При проведении исследований на модели меняются во времени X и Y . Таким образом, для изменения имитационной модели и работы с ней должна быть построена оболочка, позволяющая работать с различными вариантами исследуемой системы. Для построения такой оболочки применительно к имитационным моделям АТК использовались принципы интегрированного проектирования (ИП), разработанные в ИПУ РАН.

Средством осуществления процессов ИП являются человеко-машинные процедуры моделирования на ЭВМ, ориентированные на конкретный класс объектов и насыщенные необходимыми для этого класса моделями агрегатов, моделями их взаимосвязей, их совместной работы, моделями действия систем управления и др. Иными словами, методом решения являются проблемно-ориентированные человеко-машинные процедуры моделирования. Разработанные (для указанной конкретной сферы приложений) процедуры моделирования, обеспечивающие формирование основных технических проектных решений и их технико-экономический анализ как в плане технологии, так и управления на различных уровнях, и имитационные модели для реализации указанных процедур строятся по упомянутой выше методике.

К настоящему времени имеется опыт использования имитационных систем для следующих объектов металлургического производства:

- кислородно-конвертерные цехи с отделениями разлива в слитки и с отделениями непрерывной разлива;
- электросталеплавильные цеха с непрерывной разливкой;
- миксерные отделения доменных цехов – конвертерные цеха;
- технологические комплексы «конвертеры (или электропечи) – агрегаты внепечной обработки стали – разливочные агрегаты – склады – нагревательные агрегаты»;
- технологические комплексы «печи – стан» различных типов;
- технологические комплексы заготовочных и сортовых станов со складским, транспортным и другим вспомогательным оборудованием и др.

Следует заметить, что в данном случае речь идет о типе объекта, а не о его конкретном воплощении на каком-либо заводе. Это значит, что в имитационной системе и в программном комплексе ИМИТАМП, также разработанном в ИПУ РАН, имеются инвариантные компоненты, которые могут быть использованы независимо от того, для какого конкретного завода строится имитационная система или комплекс имитационных моделей.

Теперь остановимся на тех основных задачах, которые решены с использованием компонентов комплекса ИМИТАМП и человеко-машинных процедур имитационного моделирования. Прежде всего, укажем на три основные области проблем, к которым эти задачи относились:

- управление проектами АТК металлургических предприятий, включая и вопросы САПР для этого случая;
- комплексное исследование взаимосвязанного функционирования технологических и организационных компонентов АТК и согласованный выбор состава оборудования и параметров управляющих систем;
- управление в АТК с целью достижения определенных в качестве главных показателей эффективности, например управление качеством, управление энергосбережением и т.п.

В последнее время решаются новые задачи, относящиеся к этим областям, а также к новой области реинжиниринга избранных бизнес-процессов для технологических комплексов металлургического производства.

В качестве примера разработки интегрированной АСУТП рассмотрим листопркатный комплекс (ЛПК) «печи – стан». Многомерность и многосвязность объекта, наличие ограничений на изменение параметров процесса и управляющие воздействия затрудняют его исследование с помощью аналитических методов теории управления. В то же время для сложных объектов данного типа представляется возможным использование процедур имитационного моделирования для воспроизведения логики функционирования объекта и разработки системы управления им [3].

ЛПК «печи – стан» относится к классу непрерывно-дискретных объектов. Один из основных показателей эффективности ЛПК – сокращение ресурсо- и энергозатрат на нагрев и прокатку металла, а в качестве метода реализации этого показателя может быть использовано управление режимом обжатий в прокатных клетях [4].

Процесс энергосберегающего управления можно разделить на две стадии: исходную настройку ЛПК «печи – стан» и ее коррекцию [5]. Исходная настройка должна обеспечить некоторый оптимальный в определенном смысле режим прокатки, а ее параметры определяются заранее. Следовательно, объект управления в этом случае является дискретным. Коррекция исходной настройки на основе получаемой в процессе прокатки информации должна обеспечить в реальном масштабе времени поддержание оптимального режима прокатки при отклонении параметров процесса от расчетных значений. В этом случае объект управления следует рассматривать как непрерывный.

Исходная настройка ЛПК «печи – стан» основана на перераспределении энергии между отдельными участками ЛПК. В связи с этим разработана имитационная модель ЛПК, основу которой составляет экономико-математическая модель технологической линии «нагрев слябов – горячая прокатка полос», представляющая собой систему алгебраических и дифференциальных уравнений, описывающих основные процессы формоизменения и теплопередачи при нагреве и прокатке металла. Входными переменными модели являются толщина металла на входе и выходе ЛПК и заданная температура конца прокатки. Выходные переменные – температура нагрева слябов и распределение толщин и температур металла по прокатным клетям. Управляющие воздействия – изменение режима обжатий в клетях.

Каждая i -я прокатная клетка ЛПК характеризуется фазовым вектором

$$x = (x_1, x_2, \dots, x_n) \quad (1)$$

n -мерного фазового пространства [4], где n – количество контролируемых параметров i -й клетки. Координаты вектора фазового состояния i -й клетки – геометрические, тепло-технические и энергосиловые параметры прокатки, которые должны подчиняться условию фазового ограничения $x \in \Omega$, где множество Ω – совокупность допустимых фазовых состояний i -й клетки.

Управление процессом состоит из совокупности управлений для каждой i -й клетки:

$$u = (u_1, \dots, u_i, \dots, u_k), \quad (2)$$

где k – количество прокатных клеток, а управляющие воздействия должны принадлежать допустимой области управлений $u \in U$.

Для решения задачи энергосберегающего управления ЛПК «печи – стан» предложен критерий оптимальности, представленный в виде суммарных удельных (на единицу массы металла) затрат на нагрев и прокатку металла:

$$Q = Z + \sum_{i=1}^k \varphi(x_i, u_i), \quad (3)$$

где Z – удельные затраты на нагрев металла и его потери вследствие угара в печи; $\varphi(x_i, u_i)$ – удельные затраты на электроэнергию в i -й клетке, вектор фазового состояния которой x определен в (1), а управляющее воздействие u определено в (2).

Учитывая нелинейный характер функции цели (3) с ограничениями контролируемых параметров и управляющих воздействий в виде неравенств, поставленная задача решена с использованием метода покоординатного спуска. В результате моделирования получена последовательность решений, минимизирующая критерий оптимальности (3) и являющаяся оптимальной стратегией управления для энергосберегающего режима. Оптимальная последовательность решений представляет собой распределение толщин и температур на выходе каждой клетки, соответственно, $h = (h_1, \dots, h_i, \dots, h_k)$, и $T = (T_1, \dots, T_i, \dots, T_k)$, а также оптимальную по критерию (3) температуру нагрева сляба в печи $T_{сл}$.

В основе имитационной модели для коррекции в реальном масштабе времени параметров исходной настройки лежит алгоритм перераспределения обжатий в отдельных клетках на основе косвенного определения температуры металла по измеренным энергосиловым параметрам прокатки [5].

Суть алгоритма перераспределения обжатий заключается в следующем. Группа клеток условно разбивается на ряд областей управления, в каждую из которых входят три клетки: i – измерительная, $(i+1)$ – регулирующая, $(i+2)$ – контролирующая. Регулирование осуществляется при отклонении измеренной косвенным образом температуры в i -й клетке от расчетного значения, определенного при исходной настройке. Затем рассчитывается корректирующее воздействие для нажимного устройства $(i+1)$ -ой клетки таким образом, чтобы на выходе $(i+2)$ -й клетки получить минимально возможное отклонение температуры металла от расчетного значения при неизменной (в пределах допуска) толщине раската на выходе этой клетки. Регулирование осуществляется с учетом приведенных выше ограничений, используемых при исходной настройке, а также дополнительных ограничений на величину и скорость перемещения нажимных винтов. В

общем виде имитационная модель коррекции исходной настройки может быть представлена в виде системы уравнений:

$$\left. \begin{aligned} \widehat{T}_i &= f_1(u_i, x_i); \\ u_{i+1} &= f_2(\widehat{T}_i, \widehat{T}_{i+2}, x_{i+2}, \tau_i); \\ \widehat{T}_{i+2} &= f_3(u_{i+1}, x_{i+2}, \tau_{i+2}); \end{aligned} \right\}$$

Здесь τ_i , τ_{i+1} – время движения металла (транспортное запаздывание) соответственно от i -й до $(i+1)$ -й и от $(i+1)$ -й до $(i+2)$ -й клетки трехклетевой области управления; u_{i+1} – управляющее воздействие (изменение обжатия металла) в $(i+1)$ -ой клетки с учетом времени транспортного запаздывания τ_i ; \widehat{T}_i – измеренная косвенным образом температура металла в $(i+1)$ -й клетки; \widehat{T}_{i+2} – рассчитанное значение температуры соответствующего сечения металла (с учетом времени транспортного запаздывания τ_{i+1}) в $(i+2)$ -й клетки.

Результаты имитационного моделирования энергосберегающего управления ЛПК «печи – стан» реализованы в виде алгоритмического и программного обеспечения СУЭТ (система управления энергосберегающей технологией). Документирование и архивация информации в ПО СУЭТ осуществляются на уровне создания отдельных специализированных файлов для каждого режима исходной настройки и ее коррекции, а также файлов сервисной поддержки [6].

Обработка результатов моделирования ЛПК «печи – стан», проведенного с использованием СУЭТ, позволила установить количественную и качественную зависимости энергетических расходов от режимов прокатки и разработать структурную схему АСУ с оптимизацией режимов прокатки. В основу АСУ положена двухуровневая структура, обеспечивающая управление температурой металла как в режиме прогноза, так и в реальном масштабе времени.

Экономическая эффективность АСУ широкополосным станом с использованием энергосберегающей технологии при горячей прокатке определяется в основном следующими факторами:

- повышением производительности листопрокатного комплекса и уменьшением угара металла при нагреве слэбов в печах благодаря сокращению времени нагрева;
- уменьшением затрат энергии на нагрев и прокатку металла;
- повышением качества готовой продукции благодаря стабилизации температуры металла на выходе группы клеток.

Следует отметить возможность использования подходов, предложенных при разработке СУЭТ, для ЛПК «печи – стан» различной конфигурации как в черной, так и в цветной металлургии.

Выводы

1. С использованием имитационного моделирования разработана методика расчета управляющих воздействий, оптимальных по критерию минимизации суммарных затрат на нагрев и прокатку металла для ЛПК «печи – стан».
2. Разработанная методика легла в основу алгоритмического и программного обеспечения СУЭТ и АСУ, двухуровневая структура которой обеспечивает управление температурой металла как в режиме прогноза, так и в реальном масштабе времени.
3. Определена эффективность алгоритмов исходной настройки энергосберегающего управления и ее коррекции для различных режимов прокатки.

4. На основе описанных подходов была выполнена разработка «Инновационные компьютерные технологии модернизации основных технологических комплексов черной металлургии с целью обеспечения энерго- и ресурсосбережения и повышения качества металлопродукции», удостоенная золотой медали и диплома I Международного салона инноваций и инвестиций. В настоящее время подготовлены новые предложения по использованию разработок в инновационных проектах на ряде объектов черной металлургии в России и за рубежом.

Литература

1. **Власов С. А., Генкин А. Л., Никулина И. В., Кравцов С. В.** Интеграция систем управления в металлургическом производстве//Автоматизация в промышленности. 2007. № 3. С. 12–14.
2. **Vlasov S. A., Genkin A. L., Rozhkov I. M., Smirnov V. S.** Computer simulation for integration of CAM and CAPP systems in steelmaking//Preprints of the 10th IFAC Symposium on Information Control Problems in Manufacturing (INCOM 2001): CD Proceedings. Vienna University of Technology: Vienna, Austria, 2001.
3. **Яковис Л. М.** Имитационное моделирование – ключ к решению задач управления сложными технологическими процессами//Автоматизация в промышленности. 2006. № 7. С. 25–30.
4. **Генкин А. Л., Куделин А. Р.** Проблемы энергосберегающего управления листопрокатным комплексом. Ч. I//Проблемы управления. 2006. № 6. С. 51–54.
5. **Генкин А. Л., Куделин А. Р.** Проблемы энергосберегающего управления листопрокатным комплексом. Ч. II//Проблемы управления. 2007. № 1. С. 51–57.
6. **Генкин А. Л., Власов С. А., Масальский Я. С.** Возможности энергосберегающего управления листопрокатным комплексом//Автоматизация в промышленности. 2003. № 3. С. 44–47.