

УПРАВЛЕНИЕ НА ОСНОВЕ ПРОГНОЗИРУЮЩЕЙ МОДЕЛИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМ ПРОЦЕССОМ ВАКУУМНОЙ ПЕРЕГОНКИ МАЗУТА С УЧЕТОМ ПРИОРИТЕТОВ

А.Ю. Торгашов

Институт автоматики и процессов управления ДВО РАН
Россия, 690041, Владивосток, ул. Радио, 5
E-mail: torgashov@iacp.dvo.ru

О.Ю. Снегирев

Институт автоматики и процессов управления ДВО РАН
Россия, 690041, Владивосток, ул. Радио, 5
E-mail: snegirevoleg@iacp.dvo.ru

Ключевые слова: управление на основе прогнозирующей модели, приоритеты целей управления, процесс ректификации, вакуумная колонна.

Аннотация: Решается задача управления на основе прогнозирующей модели массообменным технологическим процессом вакуумной перегонки мазута в условиях задания приоритетов по стабилизации выходных переменных и ограничений на управляющие воздействия. Регулирование основной переменной по качеству целевого продукта вакуумной колонны одновременно связано с трудностями поддержания необходимого объема жидкой фазы в зоне вывода бокового продукта и может привести к нарушению норм технологического регламента. Рассмотрены приоритеты целей управления и их учет в алгоритме управления на основе прогнозирующей модели.

1. Введение

В настоящее время управление с прогнозирующей моделью (MPC) является актуальным подходом к решению задач управления многомерными технологическими объектами в промышленности [1,2]. В промышленных приложениях MPC выходные переменные являются управляемыми переменными или CV. Входные переменные подразделяются на управляемые переменные (MV) и DV - внешние измеряемые возмущения, например, расход сырья и т.п.

Управление с прогнозирующей моделью имеет несколько важных преимуществ с точки зрения требований, предъявляемым к современным системам управления в промышленности:

- вычисление приращений MV могут быть скоординированы с определением оптимального статического режима объекта управления, например, внешним контуром динамической оптимизации группы технологических установок [3];
- прогнозирование на основе модели обеспечивает раннее предупреждение о потенциальных проблемах выхода за регламентные ограничения технологических переменных;

- учет жестких ограничений на управляющие воздействия и их приращений, а также мягких ограничений (пределов) на CV и MV.

В настоящей работе рассматривается MPC-алгоритм с учетом приоритизации целей управления применительно к промышленной вакуумной колонне перегонки мазута.

2. Описание технологического процесса и постановка задачи

В качестве объекта исследований рассматривается массообменный (ректификационный) технологический процесс перегонки мазута (Рис.1). Особенность данного массообменного технологического процесса заключается в его протекании под вакуумом, а также в подверженности воздействию возмущений по расходу и составу сырья.

В состав системы управления входят следующие переменные CV: y_1 – температура выкипания 95% фракции дизельного топлива (ДТ), °C; y_2 – объем жидкой фазы в зоне отбора ДТ, м³; y_3 – температура в верхней части колонны К-1, °C; y_4 – содержание углеводородов до 360 °C в вакуумном дистилляте (ВД), %; y_5 – вязкость гудрона, мм²/с. В качестве MV используются переменные: u_1 – расход верхнего циркуляционного орошения (ВЦО), м³/ч; u_2 – расход ДТ, м³/ч; u_3 – расход нижнего циркуляционного орошения (НЦО), м³/ч; u_4 – расход потока на пакет насадки, м³/ч; u_5 – расход водяного пара в нижнюю часть колонны, кг/ч.

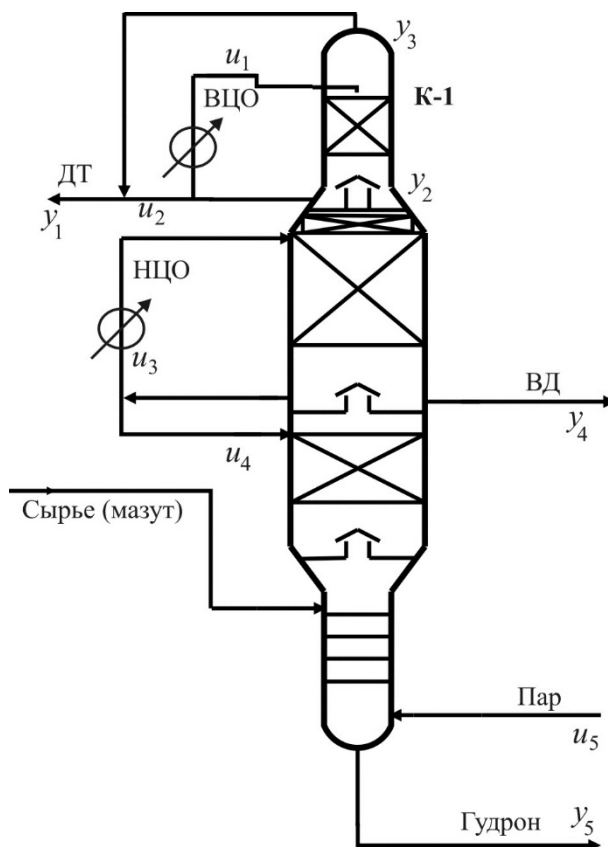


Рис. 1. Технологическая схема процесса вакуумной перегонки мазута.

Задача заключается в разработке MPC-алгоритма, учитывающего следующие четыре уровня приоритетов целей управления:

1. $|e_{2,k}| \leq e_2^r$,

2. $(|e_{1,k}| \leq e_1^r) \wedge (|e_{3,k}| \leq e_3^r) \wedge (|e_{5,k}| \leq e_5^r)$,
3. $|e_{4,k}| \leq e_4^r$,
4. $|u_5^t - u_{5,k}| \leq \delta_5$.

Приняты следующие условные обозначения: $e_{i,k}$ – значение ошибки (разность между заданием и скорректированным значением прогноза i -ой выходной переменной) в момент времени k ; e_i^r – допустимое или заданное значение ошибки i -ой выходной переменной;

$i = 1, \dots, N_y$, N_y – количество выходных переменных (CV); u_q^t – целевое значение q -ой входной переменной; δ_q – допустимое отклонение q -ой входной переменной от целевого значения; $q = 1, \dots, N_u$, N_u – количество входных переменных (MV).

3. Алгоритм управления с приоритизацией целей

При решении задач управления с приоритетами бинарные переменные могут использоваться для представления статуса целей управления в формулировке MPC [4]. Если цель управления может быть достигнута, соответствующая двоичная переменная может принимать значение 1. Например, для процесса ректификации желательно поддерживать 5-ю и 95-ю точки кипения (фракционный состав) в пределах заданных пределов. Двоичная переменная может использоваться для представления того, может ли быть достигнута эта цель управления или нет. Аналогичным образом, двоичные переменные «приоритета», соответствующие каждой переменной в цели управления, могут использоваться для представления того, что все цели с более высоким приоритетом были успешно достигнуты. Если цель управления не может быть выполнена, соответствующей переменной приоритета присваивается значение 0, а всем задачам с более низким приоритетом присваивается значение 0. Это позволяет непосредственно реализовать важность различных целей управления. В каждый момент дискретного времени необходимо найти последовательность управляющих воздействий, которая минимизирует целевую функцию

$$(1) \quad \Delta U_k^* = \arg \min_{\Delta U_k, P_k, O_k} \|E_k\|_{W_e}^2 + \|\Delta U_k\|_{W_u}^2 + \|U_k^t - U_k\|_{W_t}^2 - W_p^T P_k - W_o^T O_k,$$

где W_e , W_u , W_t – весовые матрицы; W_p – вектор весов приоритетов; W_o – вектор весов целей управления; $\|x\|_W^2 = x^T W x$. В отличие от работ [5, 6] в критерии (1) учитывается возможность приближения к целевым значениям вектора U_k^t , который характеризует оптимальный статический режим технологического объекта.

$$(2) \quad p_{j,k}, o_{j,k} \in \{0,1\},$$

где двоичные переменные и элементы $p_{j,k}$, $o_{j,k}$ (элементы векторов P_k и O_k , соответственно), используются для представления состояния достигнутых целей в порядке приоритета и состояния цели для задачи управления. Каждый из векторов P_k и O_k содержит N элементов двоичной переменной, если существует N приоритетных целей. Взвешенные ошибки регулирования E_k и ΔU_k , а также отклонение от целевого значения U_k^t в критерии выражаются через l_2 норму, что делает задачу (1) смешанной целочисленной задачей квадратичного программирования MIQP [7]. Последние два члена целевой функции MPC, представленной в уравнении (1), содержат векторы двоичных переменных P_k и O_k . Двоичные переменные $p_{j,k}$ могут быть использованы для принудительного выполнения целей в порядке их приоритетности по важности. Если цель j не может быть достигнута, то переменная для соответствующего приоритета j должна быть равна 0. Приоритетная цель j должна быть достигнута до момента достижения приоритетной цели $j + 1$, для этого используются следующие неравенства:

$$\begin{aligned}
 p_{1,k} &\leq o_{1,k} \\
 &\vdots \\
 p_{N,k} &\leq o_{N,k}.
 \end{aligned}$$

Для учета приоритетов целей:

$$\begin{aligned}
 p_{2,k} &\leq p_{1,k} \\
 &\vdots \\
 p_{N,k} &\leq p_{N-1,k}.
 \end{aligned}$$

В реальных условиях распространены ситуации, когда цель 2 не может быть достигнута из-за воздействия внешних неизмеряемых возмущений, например, по содержанию светлых продуктов в мазуте, но цель 1 может быть достигнута. Это означает, что $o_{2,k} = 0$ и, следовательно, $p_{2,k} = 0$. В результате $p_{3,k}, p_{4,k}$, т.е. переменные с более низким приоритетом должны принимать значения 0. Задачи управления обычно определяются с учетом технологических возможностей, требований и заданий производства. Как правило, для химико-технологического процесса ограничения по безопасности должны выполняться с наивысшим приоритетом. Дополнительные ограничения могут быть использованы для минимизации рисков износа технологического оборудования и поддержания качества получаемых продуктов.

4. Заключение

Рассмотрен алгоритм MPC с учетом приоритетов целей управления вакуумной колонной. Наивысший приоритет имеет задача поддержания необходимого объема жидкой фазы в зоне отбора ДТ, а далее по приоритетам: поддержание качества продуктов и, по-возможности, приближение к оптимальному статическому режиму, который определяется в результате решения верхнеуровневой задачи оптимизации группы или цепочки технологических установок по экономическому критерию. Бинарные переменные используются для выражения достижимости целей управления в приоритетном порядке. Задача смешанного целочисленного программирования решается на каждом периоде управления для определения приращений управляющих воздействий.

Список литературы

1. Rossiter J. A., Gonzalez-Villareal O. J., Sarbini M. A.M. A review of parameterised MPC algorithms // IFAC-PapersOnLine, 2023. Vol. 56, No. 2. P. 7692-7697.
2. Schwenzer M., Ay M., Bergs Th., Abel D. Review on model predictive control: an engineering perspective // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2021. Vol. 117. P. 1327-1349.
3. Lu J.Z. Closing the gap between planning and control: a multiscale MPC cascade approach // Annual Reviews in Control. 2015. Vol. 40. P. 3-13.
4. Tyler M.L., Morari M. Propositional logic in control and monitoring problems // Automatica. 1999. Vol. 35, No. 4. P. 565-582.
5. Kerrigan E.C., Maciejowski J.M. Designing model predictive controllers with prioritised constraints and objectives // Proceedings. IEEE International Symposium on Computer Aided Control System Design. Glasgow. UK, 2002. P. 33-38. DOI: 10.1109/CACSD.2002.1036925.
6. Long Ch.E., Gatzke E.P. Model predictive control algorithm for prioritized objective inferential control of unmeasured states using propositional logic // Industrial & Engineering Chemistry Research. 2005. Vol. 44, No. 10. P. 3575-3584.
7. Bemporad A. Solving mixed-integer quadratic programs via nonnegative least squares // IFAC-PapersOnLine, 2015. Vol. 48, No. 23. P. 73-79.