

STRATEGY FOR PREDICTIVE CONTROL OF THE RECTIFICATION PROCESS BASED ON A MODEL CONTROLLER WITH A GIVEN FORECAST

Ildar Rafkatovich Sultanov

Follow this and additional works at: <https://ijctcm.researchcommons.org/journal>



Part of the [Complex Fluids Commons](#), [Controls and Control Theory Commons](#), [Industrial Technology Commons](#), and the [Process Control and Systems Commons](#)



ISSN 1815-4840, E-ISSN 2181-1105

Химическая технология. Контроль и управление

CHEMICAL TECHNOLOGY. CONTROL AND MANAGEMENT

2024, №1 (115) pp.39-46

International scientific and technical journal

journal homepage: <https://ijctcm.researchcommons.org/journal/>



Article history: Received 06 February 2024; Received in revised form 27 February 2024; Accepted 29 February 2024;
Available online 19 April 2024

Since 2005

UDC 681.516.75

STRATEGY FOR PREDICTIVE CONTROL OF THE RECTIFICATION PROCESS BASED ON A MODEL CONTROLLER WITH A GIVEN FORECAST (СТРАТЕГИЯ ПРЕДИКТИВНОГО УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССОМ РЕКТИФИКАЦИИ НА ОСНОВЕ МОДЕЛЬНОГО РЕГУЛЯТОРА С ЗАДАНЫМ ПРОГНОЗОМ)

Sultanov Ildar Rafkatovich

Andijan machine building institute, Address: 170100, 56 Bobur Shox Ave, Andijan city, Republic of Uzbekistan.
E-mail: ryunusd@gmail.com, Tel: 91 602 66 04.

Abstract. A method is being developed to optimize the generated controls for the multicomponent distillation process with prediction, based on predictive data with a moving horizon. The difference between this method and the classical modeling approach, in which the percentage of the degree of opening of valves installed on the output streams of the column is used as control actions, is that control occurs on the feedback principle. The proposed method is based on the use of a dynamic process model to optimize control actions in real time in order to achieve certain production targets. The essence of the MPC approach (control based on a predictive model) to control is determined in the sequential execution of the following operations: using a predictive model, minimizing the quality functional, taking into account process dynamics, solving the optimal control problem, real-time control and taking into account process limitations.

Keywords. Control, process, rectification, model, optimization, forecast, efficiency, control, MPC approach, control actions, percentage of valve opening degree, feedback principle, dynamic process model, optimization of control actions in real time, achieving production targets, management based on a predictive model, minimizing the quality functional, taking into account process dynamics, solving the optimal control problem, real-time control, taking into account process limitations.

Annotatsiya. Harakatlanuvchi gorizont yordamida bashorat qiluvchi ma'lumotlar bazasiga asoslangan ko'p komponentli rektifikatsiya jarayoni uchun ishlab chiqiladigan boshqarishni bashorat qilish bilan optimallashtirish usuli ishlab chiqilmoqda. Kolonnaning chiqish oqimlarida o'rnatilgan klapanlarning ochilish darajasining foizi nazorat harakatlari sifatida qo'llaniladigan klassik modellashtirish usuli bilan biz taklif etayotgan usul o'rtasidagi farq shundaki, keyingi usulda boshqarish qayta aloqa tamoyili bo'yicha amalga oshiriladi. Taklif etilayotgan usul ma'lum ishlab chiqarish maqsadlariga erishishda real vaqt rejimida boshqarish ta'sirlarini optimallashtirish uchun jarayonning dinamik modelidan foydalanishga asoslangan. Boshqarishga MPC yondashuvining (bashoratli model asosida boshqarish) mohiyati quyidagi amallarni ketma-ket bajarishda aniqlanadi: bashoratli modeldan foydalanish, sifat funktsionallarini minimallashtirish, jarayon dinamikasini hisobga olish, optimal boshqarish muammosini hal qilish, real vaqt bo'yicha boshqarish va jarayon cheklovlarini hisobga olish.

Tayanch so'zlar: boshqarish, jarayon, rektifikatsiya, model, optimallashtirish, bashorat, samaradorlik, nazorat, MPC yondashuvi, boshqarish ta'sirlari, klapanlarning ochilish darajasining foizi, qayta aloqa tamoyili, jarayonning dinamik modeli, boshqarish ta'sirlarini real vaqt bo'yicha optimallashtirish, ishlab chiqarishning maqsadli ko'rsatkichlariga erishish, bashoratli modellar asosida boshqarish, sifat funktsionallari minimallashtirish, jarayon dinamikasini hisobga olish, optimal boshqarish masalasini yechish, real vaqt bo'yicha boshqarish, jarayon cheklovlarini hisobga olish.

Аннотация. Разрабатывается способ оптимизации вырабатываемых управлений процессом многокомпонентной ректификации с предсказанием, базирующийся на прогнозных данных с подвижным горизонтом управления. Отличием данного способа от классического подхода к моделированию, в котором в качестве управляющих воздействий используется процент степени открытия клапанов, установленных на выходных потоках колонны, является то, что управление происходит по принципу обратной связи. Предлагаемый способ основан на использовании динамической модели процесса для оптимизации управляющего воздействия в режиме реального времени с целью достижения определенных целевых показателей производства. Сущность

управления на основе прогностической модели определяется последовательностью выполнения следующих операций: использование прогностической модели, минимизация функционала качества, учет динамики процесса, решение задачи оптимального управления, управление в реальном времени с учетом ограничений.

Ключевые слова. управление, процесс, ректификация, прогноз, эффективность, контроль, управляющее воздействие, процент степени открытия клапаны, принцип обратной связи, динамическая модель процесса, оптимизация в режиме реального времени, достижение целевых показателей производства, управление на основе прогностической модели, минимизация функционала качества, решение задачи оптимального управления, управление в реальном времени.

Введение

Основными аспектами для оптимального управления процессом ректификации являются: эффективность и энергосбережение, качество продукции, управление тепловыми издержками, адаптивность к изменениям в сырье, минимизация потерь и отходов. Немаловажное значение представляет и распределение компонентов по высоте колонны [2,3,5], зависящее от: физико-химических свойств компонентов, определяющих скорость испарения; конденсации и перемещения компонентов внутри колонны; температурного профиля внутри колонны [1,3,6,7], что важно для обеспечения эффективного разделения; давление и фракции паров; управляющих параметров [2,3].

Целенаправленное управление этими факторами позволяет оптимизировать распределение компонентов, что в итоге влияет на эффективность процесса ректификации и качество получаемых продуктов в статических и динамических режимах работы. Поэтому, как правило, математическое описание процесса ректификации состоит из уравнений, записанных относительно концентраций компонентов [1,4,8].

Основная часть

При классическом подходе к моделированию многопараметрической системы «емкость – ректификационная колонна» в качестве управляющих воздействий используется процент степени открытия клапанов, установленных на выходных потоках колонны. Такую модель называют «ММО-моделью». При использовании такой модели с целью управления значением уровня раздела фаз в емкости и коэффициента, учитывающего перепад давления, требуется установление клапанов на трубопроводах конденсата и газа, для чего используются два ПИД-регулятора. Однако, если использовать стратегию управления, основанного на применении прогнозирующей модели, то два регулятора могут быть заменены одним.

MPC (Model Predictive Control) или предиктивное управление является передовым подходом к усовершенствованному управлению процессом ректификации. Оно основано на использовании динамической модели процесса для оптимизации управляющего воздействия в режиме реального времени с целью достижения определенных целевых показателей производства. Сущность MPC-подхода к управлению состоит в последовательном выполнении следующих операций [2,3]:

1. Использование прогностической модели: MPC использует математическую модель ректификационного процесса, которая описывает динамику процесса. Эта модель включает в себя уравнения, описывающие тепловое равновесие, массоперенос и другие физические и химические процессы, происходящие внутри колонны ректификации.

2. Минимизация функционала качества: MPC – управление использует прогностическую модель для оптимизации управляющих воздействий с целью минимизации функционала качества, который может включать в себя такие показатели, как конечная концентрация компонентов, энергопотребление, производительность и др., зависящие от конкретных целей производства.

3. Учет динамики процесса: MPC – управление учитывает динамику процесса, что позволяет регулировать переменные состояния процесса (такие как температуры, давления, концентрации и расходы жидкостей) с учетом ограничений и динамики изменений параметров.

4. Решение задачи оптимального управления: MPC формулирует задачу оптимального управления по прогностической модели и целевым показателям производства, что позволяет находить оптимальные воздействия на процесс с учетом текущих и будущих состояний системы.

5. Управление в реальном времени: MPC предназначено для решения задач управления в реальном времени. Это позволяет оперативно реагировать на изменения в процессе и корректировать управляющие воздействия, чтобы поддерживать процесс на оптимальном уровне.

6. Учет ограничений процесса: MPC учитывает ограничения процесса (такие, как физические и технологические ограничения, целевые маршруты и специфические требования безопасности), что делает его весьма гибкой и приспособляемой к различным условиям производства.

Таким образом, суть MPC-подхода к управлению процессом ректификации заключается в использовании прогностической модели процесса для оптимизации управляющих воздействий в режиме реального времени с учетом динамики процесса, целевых показателей производства и ограничений. Все это позволяет достигать эффективного и оптимального управления процессом ректификации [7-10].

Сначала подбирается относительно простая модель ректификационной колонны с начальными условиями в виде состояния объекта в данный момент времени. На основе интегрирования дифференциальных уравнений, входящих в математическое описание, осуществляется прогноз предполагаемого движения объекта на некоторый конечный отрезок времени («горизонт прогноза»), на который делается прогноз. «Горизонт прогноза» в контексте управления и прогнозирования означает период времени, на который делается прогноз или планирование. Он играет важную роль в различных областях (таких, как экономика, финансы, управление ресурсами, техническое обслуживание и управление производством). В управлении производственными процессами «горизонт прогноза» определяет период времени, на который планируются объемы производства, поставки сырья, уровень запасов и расход ресурсов. Это позволяет оптимизировать производственные процессы с учетом планируемого спроса и поставок.

На следующем шаге осуществляется оптимизация программного управления, цель которого заключается в улучшении эффективности, отказоустойчивости, качества и других параметров системы. Для этого необходимо как можно близкое совпадение переменных прогнозирующей модели с задающими сигналами на «горизонте прогноза». Необходимо отметить, что при выполнении этого этапа учитываются ограничения, которые были предъявлены к управляющим и регулируемым переменным [10-14].

Далее осуществляется переход к итеративным вычислениям, используемым в алгоритмах управления для нахождения оптимальной управляющей стратегии в реальном времени, включающих в себя расчет регуляторов, прогнозирование действий, коррекцию управляющих воздействий и принятие решений на основе текущих данных и прогнозов.

Далее осуществляется сдвиг «горизонта прогноза» на последующий шаг, а предыдущие действия закливаются. MPC-регулятор основывается на математической модели процесса ректификации. На базе сравнения предсказанных моделью данных и данных о состоянии объекта, полученных методом измерения, осуществляется прогнозирование следующего состояния объекта.

Как отмечалось выше, сначала подбирается относительно простая линейная модель, представляющая систему дифференциальных уравнений:

$$\dot{x}(k) = f(k, x(k), u(k)), \quad (1)$$

$$x(0) = x_0, \quad (2)$$

где $x \in E^n$, $u \in E^m$ – вектор управления, $k \in [0, \infty)$ – являются векторами состояния и управления соответственно.

Предположим, что существует допустимое множество управлений $U \in E^m$ и состояний $X \subseteq E^n$. В этом случае для любого возможного момента времени $k \in [0, \infty)$ необходима выполнение следующих условий: $x(k) \in X$, $u(k) \in U$.

Допустим, что для системы уравнений (1), (2) при любых $u(k)$ кусочно-непрерывных функциях $u(k)$, имеющих определенные значения из множества U , функция $f(k, x(k))$ удовлетворяет условиям существования и единственности решения задачи Коши. Также допустим, что у системы уравнений (1), (2) имеется нулевое положение равновесия: $f(k, 0, 0) = 0$.

Допустим, что множества U и X заданы в виде следующих выражений:

$$U = \{u \in E^m: u_{i \min} \leq u_i \leq u_{i \max}, i = \overline{1, m}\}, \quad (3)$$

$$X = \{x \in E^n: x_{j \min} \leq x_j \leq x_{j \max}, j = \overline{1, n}\}, \quad (4)$$

В соотношениях (3) и (4) – $u_{i \min}$, $u_{i \max}$, $x_{j \min}$, $x_{j \max}$ – задаваемые вещественные числа.

Допустим, что целью управления целью управления на основе системы уравнений (1), (2) является обеспечение равенств:

$$\lim_{k \rightarrow \infty} \|x(k) - r_x(k)\| = 0 \quad (5)$$

$$\lim_{k \rightarrow \infty} \|u(k) - r_u(k)\| = 0 \quad (6)$$

В этих выражениях: $r_x(k)$ и $r_u(k)$ – векторные функции, которые должны быть заданы. Они предназначены для определения требуемого параметра. Функционал качества управления представлен в виде:

$$J_0 = J_0(x(k), u(k)). \quad (7)$$

Будем искать оптимальное управляющее воздействие (из числа допустимых множеств управлений U), приводящее к цели управления, выражаемое в виде (5), (6) с учетом ограничений $x(k) \in X \forall k \in [0, \infty)$, при этом функционал (7) должен достигать своего минимума.

Для решения задач оптимального управления существует определенное количество методов [1,2,3], но основной проблемой реализации оптимального управления для сложного объекта является комбинация нескольких факторов, которые обычно делают эту задачу сложной и требуют следующих специальных методов и подходов:

1. Высокая размерность пространства состояний и управления: сложные объекты обычно имеют большое количество параметров, переменных состояния и управления, что приводит к высокой размерности пространства, в котором осуществляется поиск оптимального управления, это усложняет анализ и, численные вычисления, требуя больших вычислительных ресурсов и может приводить к проклятию размерности.

2. Нелинейность и сложные зависимости: сложные системы обычно характеризуются нелинейными зависимостями между входными и выходными переменными, что затрудняет процесс аналитического построения оптимального управления и требует применения численных методов оптимизации.

3. Неопределенность и изменчивость: сложные объекты могут проявлять различные виды неопределенности, включая стохастические возмущения, изменение параметров с течением времени или неопределенность в моделях, это усложняет прогнозирование и планирование оптимального управления.

4. Комплексность динамики системы: сложные объекты могут иметь сложную нелинейную динамику, включая переходные процессы, неоднородности в пространстве и времени, множественные временные масштабы, что затрудняет представление системы и требует глубокого понимания ее поведения.

5. Ограничения и нелинейность управляющих воздействий: сложные объекты часто имеют ограничения на управляющие воздействия, и эти ограничения также могут быть нелинейными, что усложняет задачу поиска оптимального управления.

6. Вычислительная сложность: реализация оптимального управления для сложного объекта часто связана с высокой вычислительной сложностью, что требует использования

высокопроизводительных вычислительных ресурсов и развитых методов численной оптимизации.

7. Определение критериев оптимальности: выбор критериев оптимальности и их построение для сложных объектов также представляет собой сложную задачу, требующую учета множества факторов и особенностей системы.

Но главной задачей реализации оптимального управления является построение точного математического описания [2,3]. Именно для таких случаев и разрабатывается МРС-управление, в основе которого лежит принцип обратной связи, в соответствии с которым информация об объекте управления используется при формировании управляющего сигнала.

Рассмотрим систему следующего вида:

$$\dot{\bar{x}}(\tau) = f(\tau, \bar{x}(\tau), \bar{u}(\tau)), \quad (8)$$

$$\bar{x}|_{\tau=k} (0) = x(k), \quad (9)$$

В этих соотношениях $\bar{x} \in E^n$ – вектор состояния; $\bar{x} \in E^m$ – вектор управления, $\tau \in [k, \infty)$.

Последняя система уравнений представляет собой прогностическую модель, введение которой объясняется несколькими фундаментальными причинами, которые делают ее целесообразной в различных областях, к числу которых можно отнести:

- предвидение будущих состояний: прогностическая модель позволяет предвидеть будущие состояния системы на основе текущих данных;
- принятие обоснованных решений: имея прогностическую модель, можно принимать обоснованные решения на основе будущих прогнозов состояний;
- оптимизация управления и ресурсов: прогностические модели позволяют оптимизировать использование ресурсов и управлять системой на основе прогнозируемого поведения;
- предотвращение аварий и нарушений: прогностические модели обеспечивают предупреждение потенциальных аварий, отказов и нарушений, что позволяет принимать превентивные меры по предотвращению возможных проблем.

Таким образом, введение прогностической модели оправданно, поскольку он позволяет выявлять закономерности развития системы, предсказывать возможные сценарии и принимать обоснованные управленческие решения на основе будущих прогнозов состояний системы. Среди неучтенных факторов могут быть: некоторые нелинейности объекта, возможное изменение параметров и т.д.

Результаты

Допустим, что модель вида (1), (2) в достаточной степени точно описывает объект управления, но с течением времени может претерпевать какие-то изменения. Однако заранее знать и учесть эти изменения невозможно, в то время как уравнения модели (8), (9) инициализируются в момент времени $\tau=k$ текущим состоянием реального объекта. Объясняется это близостью модели к объекту управления несмотря на существование каких-то вариаций неучтенных факторов, что способствует выработке прогноза поведения объекта управления. Прогнозировать возможно лишь на основе частного решения системы (8, 9) при условии, что задано управление на временном отрезке $\tau \in [k, k+p]$. Полученный результат зависит от величины p ($p>0$), чем она меньше, тем точнее результат. Схема составления прогноза продемонстрирована на рисунке 1.

На оси абсцисс данной схемы отложены моменты времени τ . В качестве начального момента времени принят момент $\tau=k$. До начального момента изменение объекта управления с неопределенной достоверной моделью вида (1), (2) осуществлялось по заданному управлению $u(\tau)$, вырабатываемого системой с обратной связью. В момент $\tau=k$ объект управления перешел в состояние $x(k)$.

Допустим управление $\bar{u} = \bar{u}(\tau)$ представлено в виде функции на временном отрезке $\tau \in [k, k + p]$. Требуется проинтегрировать систему (8), (9) при начальных условиях $\bar{x}|_{\tau=k} = x(k)$.

Полученное частное решение $\bar{x} = \bar{x}(\tau, x(k), \bar{u}(\tau))$, будет представлять собой предсказанное поведение объекта управления с горизонтом предсказания p . Естественно, динамики прогностической модели и объекта будут различаться. Этим можно объяснить различие их движения на данном участке, совпадение их движений может быть гарантировано только в начальной точке. На этом шаге возникает необходимость формулирования задачи об определении оптимального управления, основанного на прогнозе.

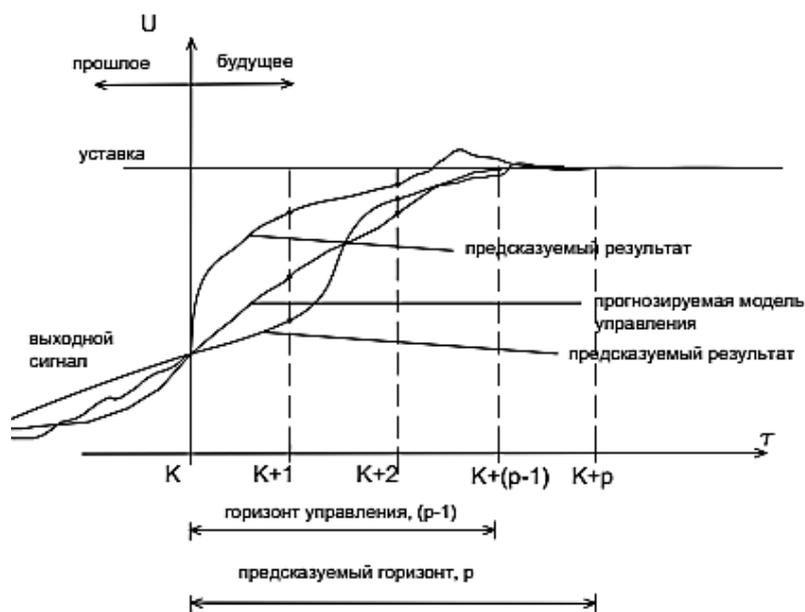


Рис. 1. Схема составления прогноза.

Допустим, что некоторое заданное поведение модели (8), (9) является целью управления. Поведение прогностической модели зависит от функций $rx(k)$ и $rU(k)$, $rx(k) \in E^n$, $rU(k) \in E^m$. Чтобы оценить качество управления с прогностической моделью используется функционал следующего вида:

$$J(x(k), \bar{u}(\cdot), p, (p-1)) = \int_k^{k+p} F(\bar{x}(\tau, x(k), \bar{u}(\tau)), \bar{u}(\tau), r_x(\tau), r_u(\tau)) d\tau, \quad (10)$$

где $(p-1)$ – «горизонт управления», его величина может быть равна или меньше p .

«Горизонт управления» представляет собой определенный момент времени, такой что:

$$\bar{u}(\tau) = \bar{u}(k + (p-1)) \forall \tau \in [k + (p-1); k+p]. \quad (11)$$

В научных исследованиях достаточно часто во избежание подынтегральной функции применяется сумма, состоящая из двух квадратичных форм:

$$F = (\bar{x} - rx)' R (\bar{x} - rx) + (\bar{u} - ru)' Q (\bar{u} - ru), \quad (12)$$

В этом выражении R и Q – матрицы, удовлетворяющие два важных свойства: симметрические и положительно определенные.

Симметричная матрица – это элементы матрицы одинаковы относительно главной диагонали. Формально, если у нас есть матрица A , то A равна своему транспонированному виду A^T .

Матрица считается положительно определенной, если для любого ненулевого вектора x выполняется условие $x^T A x > 0$, где x^T обозначает операцию транспонирования. Это означает, что определитель всех главных миноров матрицы положителен.

Поставленную задачу, оптимального управления с использованием прогностической модели можно представить в следующем виде;

$$j(x(k), \bar{u}(\cdot), p, (p-1)_s) \rightarrow \min_{\bar{u}(\cdot) \in \Omega_u} \quad (13)$$

где:

$$\Omega_u = \{ \bar{u}(\cdot) \in K_n^0[k, k+p] : \bar{u}(\tau) \in U, \bar{x}(\tau, x(t)) \in X, \forall \tau \in [k, k+p] \} \quad (14)$$

Величина, определяемая уравнением (14), является одной из возможно допустимых множеств управлений

$K_n^0[k, k+p]$ - множество скалярных произведений, представленных в векторной форме, определяемых на отрезке времени $[k, k+p]$.

Итогом решения (12) является функция, представляющая собой вектор:

$$\bar{u}^*(\tau) = \bar{u}^*(\tau, x(k), p, p-1) = \arg \min_{\bar{u}(\cdot) \in \Omega_u} j(x(k), \bar{u}(\cdot), p, (p-1)) \quad (15)$$

определяющий оптимальное программное управление для прогнозирующей модели (8), (9) и (13), поскольку она гарантированно сводит значение нижеприведенного функционала к минимуму.

$$V(x, p, (p-1)) = \min_{\bar{u}(\cdot) \in \Omega_u} J(x(k), \bar{u}(\cdot), p, (p-1)) = J(x(k), (\cdot), p, (p-1)) \quad (16)$$

Поскольку между двумя моделями (1,2) и (8, 9) определено будут расхождения, то тождественного равенства между функциями $f(\cdot) \equiv \bar{f}(\cdot)$ не предполагается. На этом основании можно сделать заключение, что при выработке управления, основанного на однократном прогнозировании, будут возникать значительные отклонения. Поэтому для обеспечения оптимального программного движения требуется проведение многократного прогноза, осуществленного с периодом p . При выполнении этого условия выработанное оптимальное управление на отрезке $[k, k+p]$ может быть подано на объект управления $u(k) \equiv \bar{u}(\tau)$ только после этого производится поиск оптимального управления на временном отрезке $[k+p, k+2p]$.

Однако, даже при таком подходе для выработки управления обнаруживается следующий недостаток: управление на каждом временном участке осуществляется без учета обратной связи (по разомкнутой схеме).

Поскольку динамика предсказываемого движения может несколько отличаться от динамики движения реального объекта, то может сложиться так, что управление на суммарном промежутке времени будет существенно отличаться от оптимального. Поэтому надо сделать так, чтобы управление воздействовало на объект управления не на всем интервале $[k, k+p]$, а на определенной его части. В этом случае управление можно представить в виде следующего тождества:

$$\bar{u}(\tau) \equiv \bar{u}(\tau, x(k), p, (p-1)), \tau \in [k, k+\delta] \quad (17)$$

В этом тождестве δ должно быть больше нуля, но значительно меньше p .

Алгоритм управления с прогнозированием можно представить в виде последовательного выполнения следующих операций:

- оценка переменных, входящих в вектор $x(k)$, определяющий состояние объекта управления;
- решение оптимизационной задачи для прогностической модели (8), (9) с начальными условиями $\bar{x}|_{\tau=k} = x(k)$
- выработка оптимального программного управления $\bar{u}^*(\tau, x(k), p, (p-1))$ и реализация на временном интервале $\tau \in [k, k+\delta]$;
- осуществление сдвига момента времени на δ с закливанием предыдущих пунктов.

Заклучение

Подведем итог изложенному. За выполнением управления (13) в момент времени $k+\delta$ осуществляется расчет следующего прогнозного поведения объекта управления с горизонтом предсказания p . Для этого горизонта предсказания оптимизируется решение задачи, которое осуществляется на отрезке $\tau \in [k+\delta, k+2\delta]$. При этом в качестве начального условия для прогностической модели служит результат, полученный на предыдущем шаге $\bar{x}|_{\tau=k+\delta} = x(k+\delta)$. Этот полученный результат применяется к объекту управления на отрезке $\tau \in [k+\delta, k+2\delta]$ и т.д. Резюмируя, необходимо отметить, что предлагаемый способ оптимизации вырабатываемых управлений с предсказанием базируется на прогнозных данных с подвижным горизонтом. Отличительной чертой этого способа является то, что управление происходит по принципу обратной связи. При этом вся необходимая информация о временных изменениях объекта управления подается дискретно в моменты времени $0, \delta, 2\delta$ и т.д.

Суть MPC-подхода к управлению процессом ректификации заключается в использовании прогностической модели процесса для оптимизации управляющих воздействий в режиме реального времени с учетом динамики процесса, целевых показателей производства и ограничений, что позволяет достигать эффективного и оптимального управления процессом ректификации.

References

1. Azizov, S.A., Ali-zade, N.S., Iskander-Zade, A., Molchanov, A.M. (1974). *Sovremennoye sostoyaniye matematicheskogo modelirovaniya rektifikatsionnykh kolonn [The current state of mathematical modeling of distillation columns]*. Moskva: Preprinty IPM im. M.V.Keldysha, 18 p. (in Russian).
2. Avazov, Yu.Sh., Kadyrov, Yo.B., Sattarov, O.U. (2013). Modelirovaniye sistemy upravleniya protsessom rektifikatsii [Modeling of the rectification process control system]. *Teplotexnika i informatika v obrazovanii, nauke i proizvodstve*. 128-131. (in Russian).
3. Mukhitdinov, D.P., Kadirov, Y.B., Sultanov, I.R. (2022). Control of the rectification column to ensure the required quality of the top product. *Orgkomitet III Mejdunarodnoy konferentsii ICMSIT-III-2022: «Control of the rectification column to ensure the required quality of the top product» Journal of Physics: Conference ICMSIT-III-2022-3029*. DOI 10.1088/1742-6596/2373/7/072025
4. Petar Durdevic, Zhenyu Yang. (2018). *Application of Robust Control on a Scaled Offshore Oil and Gas De-Oiling Facility*. *Energies*. 11. 287 p.
5. Dozortsev, V.M., Itskovich, E.L., Kneller, D.V. (2013). Uovershenstvovannoye upravleniye texnologicheskimi protsessami (ARS): 10 let v Rossii [Process Control Improvement (ARS): 10 years in Russia]. *Avtomatizatsiya v promyshlennosti*. 1, 12-19. (in Russian).
6. Dozortsev, V.M., Kneller, D.V. (2005). APC – usovershenstvovannoye upravleniye texnologicheskimi protsessami [APC – Advanced process control]. *Datchiki i sistema*, 10, 56-62. (in Russian).
7. Camacho, E.F., Bordons, C. (2004). *Model Predictive Control*. London: SpringerVerlag, 294 p.
8. Holkar, K.S., Waghmare, L.M. (2010). An Overview of Model Predictive Control. *International Journal of control and automation*, 3(4), 47-63.
9. Veremey, Ye.I., Yeremeyev, V.V. Vvedeniye v zadachi upravleniya na osnove predskazaniy [Introduction to prediction-based management tasks]. [Elektronnyy resurs]. Rejim dostupa: <http://matlab.exponenta.ru/modelpredict/book1/0.php>. (in Russian).
10. Veremey, Ye.I. Realizatsiya optimizatsionnogo podxoda k proyektirovaniyu sistem upravleniya v srede MATLAB [Implementation of an optimization approach to the design of control systems in the MATLAB environment]. [Elektronnyy resurs]. Rejim dostupa: <https://matlab.ru/upload/resources/EDU%20Conf/pp%2019-39%20Veremey.pdf>. (in Russian).
11. Dlima, M.F. (2017). Nonlinear Model Predictive Control of Gravity Separators. *Norwegian University of Science and Technology Department of Chemical Engineering*. 142 p.
12. Nadejdin, I. S., Goryunov, A. G., Manenti, F. (2018). Sistemy upravleniya nestatsionarnym ob'ektom na osnove mpc-regulyatora i pid-regulyatora s nechetkoy logikoy [Control systems for a non-stationary object based on an MPC controller and a fuzzy logic PID controller]. *Upravleniye bolshimi sistemami*. 50-75. (in Russian).
13. Mukhitdinov, D.P., Sultanov, I.R. Current state of modeling problems and management of rectification processes. *American Journal of Engineering and Technology*. <https://doi.org/10.37547/tajet/Volume05 Issue11-19>.
14. Sultanov, I.R. (2023). Rektifikatsiya jarayonlarini optimal boshqarish ayrim usullari. *Mexatronika va robototexnika: muammolar va rivojlanirish istiqbollari*, Andijon.