

УПРАВЛЕНИЕ ХИМИКО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ СИСТЕМОЙ СИНТЕЗА АММИАКА НА ОСНОВЕ ДИСКРЕТНЫХ ПРОГНОЗИРУЮЩИХ МОДЕЛЕЙ ПРОСТРАНСТВА СОСТОЯНИЙ

Кулишенко Р.Ю.¹, Исаченков А.А.¹, Холоднов В.А.¹

¹ФГБОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный технологический институт (технический университет)», г. Санкт-Петербург, Россия (190013, г. Санкт-Петербург, Московский пр. 26), e-mail: admin@sa.lti-gti.ru

В данной статье рассматривается применение концепции управления на основе прогнозирующих моделей (MPC – Model Predictive Control) пространства состояний к строгой нелинейной компьютерной модели химико-технологической системы (ХТС) секции синтеза аммиака с одноступенчатой конденсацией, реализованной в программном пакете Aspen Dynamics. Процесс синтеза аммиака осуществляется в трехполочной колонне аксиального хода газа с холодными байпасами и рециклами по теплоте и веществу. При описании нестационарных режимов колонны синтеза использовалась модифицированная кинетическая зависимость Темкина-Пыжева, расчет скорости реакции по которой осуществлялся с помощью специализированного пользовательского модуля, разработанного авторами. Управление объектом осуществляется по выходу, при прогнозе и оценке вектора состояния объекта используется дискретная линейная стационарная модель пространства состояний. В качестве инструмента исследования используется MPC Toolbox пакета компьютерной математики MATLAB/Simulink.

Ключевые слова: синтез аммиака, химико-технологическая система, прогнозирующая модель, линейная стационарная система

DISCRETE-TIME STATE-SPACE MODEL PREDICTIVE CONTROL OF AN AMMONIA SYNTHESIS PLANT

Kulishenko R.Y.¹, Isachenkov A.A.¹, Kholodnov V.A.¹

¹ St. Petersburg State Institute of Technology, St. Petersburg, Russia (26, Moskovskij pr., St. Petersburg, Russia, 190013), e-mail: admin@sa.lti-gti.ru

The article presents application of state-space linear time invariant (LTI) model predictive control (MPC) to a rigorous nonlinear Aspen Dynamics model of an ammonia synthesis loop with single-stage condensation. In this study, the ammonia synthesis process occurs in a three-bed axial-flow quench convertor. The model has heat integration and a recycle stream. In an ammonia synthesis convertor dynamics simulation the modified Temkin-Pyzev kinetic equation was used. The reaction rate using the custom user kinetics module developed by the authors was calculated. The object output was controlled. The discrete linear time-invariant state space model for prediction and estimation of the plant state was used. MATLAB/Simulink MPC Toolbox computer as a research tool was used.

Keywords: ammonia process, chemical engineering system, Aspen Dynamics, Model Predictive Control, Linear Time Invariant

Практическое применение технологии «классического» MPC к сложным объектам химической технологии, особенно к используемым в процессах синтеза, затруднительно ввиду:

- нелинейности уравнений математического описания в используемых моделях и, как следствие, наличие проблем их сходимости при решении задачи оптимизации на каждом шаге прогноза;
- наличия неизмеряемых возмущений;
- наличия помех в контурах управления и измерения;

- невозможности измерения вектора состояния объекта;
- необходимости учета ограничений на управляющие и управляемые переменные и, как следствие, невозможности быстрого и аналитического решения задачи минимизации квадратичного функционала качества управления;
- необходимости быстрого расчета прогноза.

Целью данной статьи является применение одной из промышленных реализаций управления на основе прогнозирующих моделей к строгой нелинейной модели динамики объекта при использовании для прогнозирования дискретной линейной стационарной модели пространства состояний.

В качестве инструмента исследования в статье используется пакет MPC Toolbox системы компьютерной математики MATLAB/Simulink. Подробное описание моделей, используемых MPC Toolbox при оценке и прогнозе состояния, а также наблюдателя состояния приведено в работе [2].

Описание объекта управления

В качестве объекта управления MPC-регулятора используется строгой нелинейная модель динамических режимов ХТС секции синтеза аммиака [5], построенная в программном пакете Aspen Dynamics. Модель является упрощенной реализацией схемы технологического процесса Kellogg с трехполочной колонной синтеза без вторичного аммиачного сепаратора (т.к. содержание аммиака в синтез-газе постоянно и не превышает 5%) [1]. Каждый слой катализатора (полка) моделируется блоком адиабатического реактора идеального вытеснения (модель RPlug). Модель представляет собой систему дискретизированных по пространству обыкновенных дифференциальных уравнений материального и теплового баланса, полученных по методу конечных разностей.

Скорость химической реакции в данной модели рассчитывалась помощью специального программного модуля, разработанного авторами и реализующего различные известные кинетические закономерности процесса синтеза аммиака на промотированных железных катализаторах. При расчетах данной модели использовалось модифицированное уравнение Темкина-Пыжева в терминах активностей [3]:

$$r_{NH_3} = 2k\eta A_c \left[K_{eq}^2 \left(\frac{a_{N_2} a_{H_2}^{3/2}}{a_{NH_3}} \right) - \left(\frac{a_{NH_3}}{a_{H_2}^{3/2}} \right) \right] = \left[\frac{\text{кмоль}}{\text{ч} \cdot \text{м}^3 (\text{кат.})} \right], \quad (1)$$

где:

$a_{N_2}, a_{H_2}, a_{NH_3}$ – активности (фугитивности) соответствующих компонентов реакции, атм,

$2k = 1.7698 \times 10^{15} \exp\left(\frac{-40765}{R'T}\right)$ – константа скорости реакции,

$A_c = 0,87$ – коэффициент активности катализатора,

$$\lg K_{eq} = -2.691122 \lg T - 5.519265 \times 10^{-5} T + 1.848863 \times 10^{-7} T^2 + \frac{2001.6}{T} + 2.6899$$

– константа равновесия,

η – коэффициент диффузионного торможения, рассчитываемый по эмпирическому кубическому уравнению:

$$\eta = b_0 + b_1 T + b_2 \varphi + b_3 T^2 + b_4 \varphi^2 + b_5 T^3 + b_6 \varphi^3, \quad (2)$$

коэффициенты b_i , ($i = \overline{1, 6}$) которого получаются интерполированием таблицы, приведенной в [Dyson], при заданном давлении системы.

Блок-схема объекта управления – модели ХТС секции синтеза в Aspen Dynamics – представлена на рисунке 1.

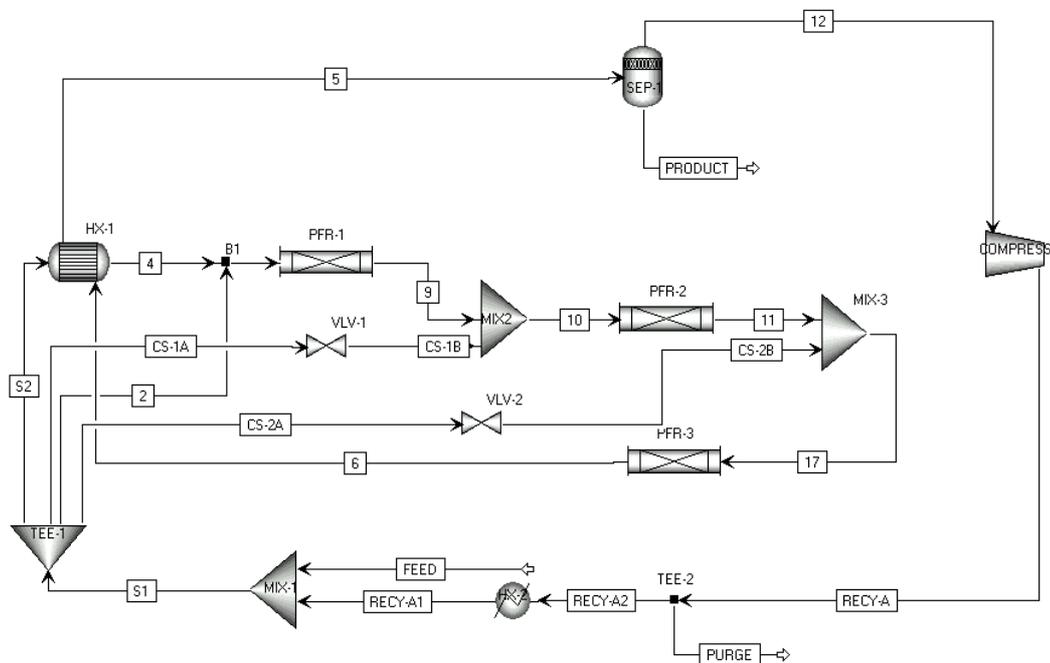


Рис.1.Схема объекта управления MPC-регулятора

Идентификация модели объекта пространства состояний

Матрицы пространства состояний A , B , C и D были получены путем линеаризации системы нелинейных уравнений динамики объекта:

$$\begin{cases} \dot{x} = f(x, u, v, d) \\ y = h(x, u, v, d) \end{cases} \quad (3)$$

при некоторых номинальных значениях $x = x_0$, $u = u_0$, $v = v_0$, $d = d_0$.

Тогда процесс линеаризации может быть представлен в следующем виде:

$$\begin{aligned} \dot{x} \cong & f(x_0, u_0, v_0, d_0) + \nabla_x f(x_0, u_0, v_0, d_0)(x - x_0) + \nabla_u f(x_0, u_0, v_0, d_0)(u - u_0) + \\ & \nabla_v f(x_0, u_0, v_0, d_0)(v - v_0) + \nabla_d f(x_0, u_0, v_0, d_0)(d - d_0) \end{aligned} \quad (4)$$

$y \cong$

$$h(x_0, u_0, v_0, d_0) + \nabla_x h(x_0, u_0, v_0, d_0)(x - x_0) + \nabla_u h(x_0, u_0, v_0, d_0)(u - u_0) + \nabla_v h(x_0, u_0, v_0, d_0)(v - v_0) + \nabla_d h(x_0, u_0, v_0, d_0)(d - d_0),$$

где матрицы пространства состояний получаются из матриц Якоби вышеприведенных уравнений.

Идентификация модели осуществлялась в стационарном режиме функционирования ХТС. Была использована встроенная функция пакета Aspen Dynamics – Control Design Interface (CDI). В результате была получена непрерывная линейная стационарная модель вида:

$$\begin{cases} \dot{x} = Ax + Bu \\ y = Cx + Du \end{cases} \quad (5)$$

которая впоследствии дискретизировалась во времени с использованием известных закономерностей. Матрицы пространства состояний A , B , C и D были получены с помощью подпрограммы-макроса для CDI. Расчет осуществляется путем исключения из исходной динамической модели всех алгебраических переменных, которые не были включены в линеаризованную модель.

Полученная модель включает 192 переменные состояния, 4 управляющие переменные и 4 переменные выхода:

- Матрица A содержит 20029 ненулевых элементов.
- Матрица B содержит 566 ненулевых элементов.
- Матрица C содержит 24 ненулевых элемента.
- Матрица D является нулевой, т.к. принимается, что система не имеет явной прямой связи.

Индекс Нидерлински [4] равен 0,092529 (> 0), что говорит о том, что замкнутая МИМО-система может быть устойчивой.

Описание переменных – компонент векторов выхода и управления – представлено в таблицах 1 и 2. Для корректной приоритизации переменных объекта при их использовании в процессе минимизации квадратичного критерия качества управления, было выполнено их масштабирование. Номинальному значению переменной сопоставлялось значение 50%.

Таблица 1

Вектор выходных переменных объекта (измерений)

№ п/п	Обозначение	Описание	Номинальное значение в единицах измерения	Номинальное значение в %
-------	-------------	----------	---	--------------------------

1	$T_{out,1}$	Температура газа на выходе с I полки колонны синтеза, °С	466,4	50
2	$T_{out,2}$	Температура газа на выходе со II полки колонны синтеза, °С	495,4	50
3	$T_{out,3}$	Температура газа на выходе с III полки колонны синтеза, °С	490,0	50
4	$Zn_{CH_4,Rec}$	Содержание инертной примеси (метана) в циркуляционном газе, мольные доли	0,048	50

Таблица 2

Вектор управляющих переменных объекта

№ п/п	Обозначение	Описание	Номинальное значение	Номинальное значение в %
1	Sf_1	Относительный расход холодного байпаса на I полку колонны синтеза	0,23	50
2	Sf_2	Относительный расход холодного байпаса на II полку колонны синтеза	0,14	50
3	Sf_3	Относительный расход холодного байпаса на III полку колонны синтеза	0,13	50
4	Sf_{Purge}	Положение заслонки делителя потока продувочного газа	0,03	50

Принципиальная схема системы управления

В предлагаемой схеме управления температуры на выходе из каждой полки управляются путем изменения положения заслонок делителя потоков холодных байпасов, подаваемых перед соответствующей полкой. Также необходимо ограничивать содержание инертных примесей в циркуляционном газе на требуемом уровне, что обеспечивается изменением положения заслонки делителя продувочного газа (изменением его относительного расхода).

В данной работе не учитываются нелинейности, вносимые характеристиками вентиляей, используемых для дросселирования потоков, подаваемых в колонну синтеза по линиям холодных байпасов, т.к. подразумевается, что MPC-регулятор управляет заданием регуляторов более низкого уровня, что является общепринятой практикой в промышленности. В качестве регуляторов низкого уровня предлагается использовать робастные регуляторы первого порядка, синтез которых не является темой данного исследования.

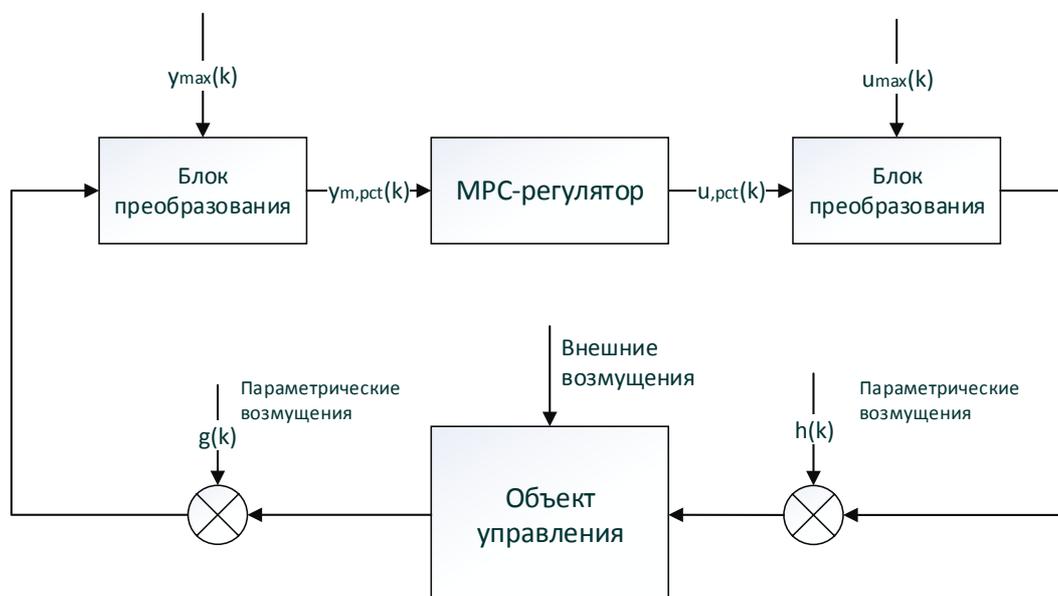


Рис. 2. Структурная схема системы управления

Для решения задачи прогнозирующего управления использована схема управления, структура которой представлена на рисунке 2. Масштабирование векторов состояния и управления объекта осуществляется в режиме реального времени в блоках преобразования, входными параметрами которых являются векторы максимальных значений соответствующих переменных. Предложенная схема предусматривает возможность проверки работоспособности системы управления на предмет отработки различных параметрических возмущений.

Для реализации данной схемы управления использовался пакет Simulink. В качестве модуля сопряжения Simulink с Aspen Dynamics использовался специальный блок AMSimulink, входящий в комплект поставки Aspen Dynamics.

Переходные характеристики процесса регулирования

Результаты работы системы управления при отработке ступенчатого возмущения по всем каналам управления в момент времени $t = 0$ ч представлены на рисунке 3.

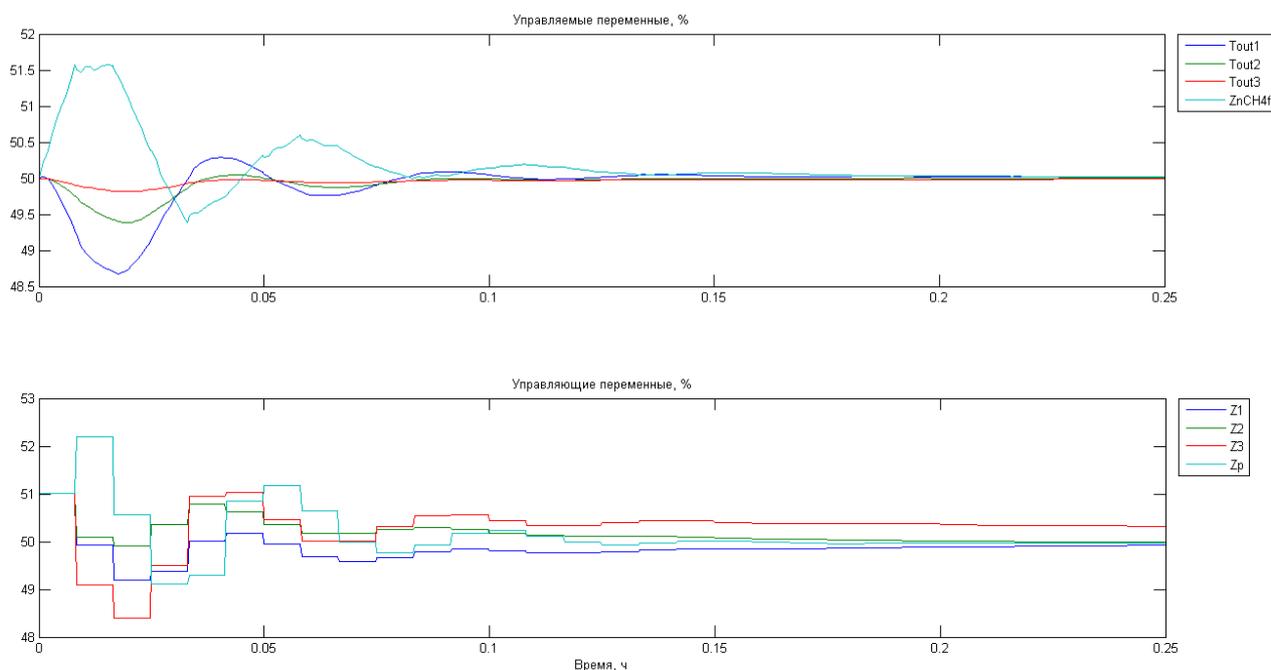


Рис. 3. Переходная характеристика процесса, вызванная ступенчатым воздействием по всем каналам управления (время дискретизации 5 с)

Быстродействие MPC-регулятора может быть достигнуто за счет увеличения коэффициентов модели неизмеряемых возмущений. Результаты увеличения коэффициента усиления наблюдателя состояния в 32 раза от номинального представлены на рисунке 4.

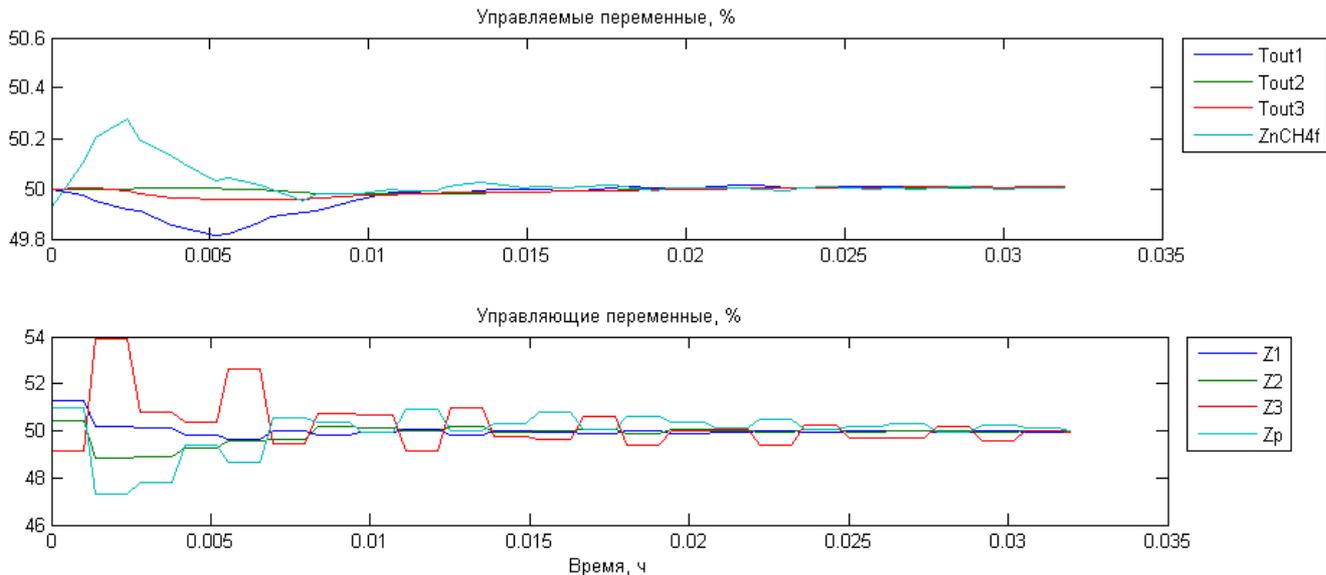


Рис. 4. Переходная характеристика процесса, вызванная ступенчатым воздействием по всем каналам управления (время дискретизации 3 с)

Выводы

1. Компьютерная модель секции синтеза в Aspen Dynamics совместно с модулем расчета кинетики позволили получить линеаризованную модель объекта в пространстве состояний.

2. Линеаризованная модель пространства состояний была использована при синтезе многопараметрической (ММО) системы МРС-управления температурным режимом колонны синтеза, а также содержанием инертных примесей в циркуляционном газе.
3. Предложенная система управления показала работоспособность в условиях параметрических возмущений по всем каналам управления, а также при наличии внешних возмущений.

Список литературы

1. Аммиак: вопросы технологии: производственно-практическое издание / И. М. Демиденко [и др.]; общ. ред. Н. А. Янковский. – Горловка : ОАО «Концерн Стирол», 2001. – 497 с.
2. Bemporad A., Ricker N.L., Owen L.G. Model Predictive Control – New tools for design and evaluation // American Control Conference, 2004. Proceedings of the 2004. – V. 6. – P. 5622–5627
3. Dyson D.C., Simon J.M. A Kinetic Expression with Diffusion Correction for Ammonia Synthesis on Industrial Catalyst // I & EC Fundamentals. – V. 7, 1968. – p. 604-610.
4. Niederlinski A. A heuristic approach to the design of linear multivariable control systems // Automatica. 1971. N.7. P.691-701.
5. Rase H.F. Chemical Reactor Design for Process Plants. Volume 2: Case Studies and Design Data // John Wiley & Sons, 1977. – p. 60-85.

Рецензенты:

Мусаев А.А., д.т.н., профессор, декан факультета информационных технологий и управления ФГБОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный технологический институт (технический университет)», г.Санкт-Петербург;

Харазов В.Г., д.т.н., профессор, профессор кафедры автоматизации процессов химической промышленности ФГБОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный технологический институт (технический университет)», г.Санкт-Петербург.