

Раздел 8. УПРАВЛЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ

УДК 547.4

ОЦЕНКА ОБЩЕСИСТЕМНЫХ И СТРУКТУРНЫХ СВОЙСТВ РЕАКТОРА-ДОПОЛИМЕРИЗАТОРА КАК ОБЪЕКТА УПРАВЛЕНИЯ

Алексеев Евгений Алексеевич (eaa90@inbox.ru)

Головушкин Борис Анатольевич

Лабутин Александр Николаевич

Ерофеева Елена Владимировна

ФГБОУ ВПО «Ивановский государственный химико-технологический университет»

Проведены исследования общесистемных и структурных свойств реактора-дополимеризатора методами имитационного моделирования. Выбраны каналы управления.

Ключевые слова: управляемость, наблюдаемость, связность.

В настоящее время исследователями широко используются методы имитационного моделирования технологических процессов синтеза синтетических полимеров для решения различных задач оптимизации и управления. Для проведения процесса в рамках оптимальных, с точки зрения экономических или технико-экономических критериев, режимов необходимо создание эффективной системы управления. Для решения этой задачи проведено исследование стадии твёрдофазного дополиамидирования процесса синтеза полиамида-6 как объекта управления.

В настоящей работе объектом исследования является реактор-дополимеризатор, в котором протекает стадия твёрдофазного дополиамидирования процесса синтеза полиамида-6 [1]. В ходе ранее проведённых исследований была разработана математическая модель этой стадии, проведено имитационное модели-

рование и подтверждена адекватность полученной модели [2].

Целью работы является исследование общесистемных и структурных свойств объекта методами математического и имитационного моделирования.

Оценка связности

Для того чтобы оценить связность нашего объекта необходимо определить безразмерные коэффициенты передачи по каналам управления.

Исходя из технологических особенностей процесса, были выбраны следующие входные и выходные переменные:

- входные переменные: расходы гранул полимера ($v_{зр}$), азота ($v_{зф}$) и теплоносителя ($v_{тн}$);
- выходные переменные: концентрации капролактама ($C_{кл}$) и воды ($C_в$) в гранулах полимера и температура в аппарате (T).

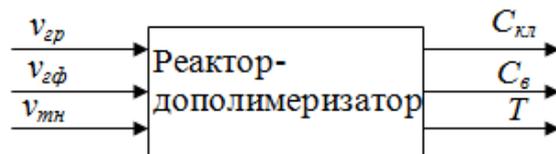


Рисунок 1. Структура объекта

Покажем на примере канала управления «расход гранул – концентрация мономера в полимере» как определялись безразмерные коэффициенты передачи. Модель объекта вывела на установившейся режим, после чего давалось приращение входной переменной и фиксировалось получившееся в результате моделирования новое значение выходной переменной. Далее вычисляли безразмерный коэффициент K_{δ} :

$$K_{\delta} = \frac{(C_{кл} - C_{кл,0}) \cdot (v_{зр,max} - v_{зр,min})}{(C_{кл,max} - C_{кл,min}) \cdot (v_{зр} - v_{зр,0})} \quad (1)$$

где $C_{кл,max}$ и $C_{кл,min}$ – максимально и минимально возможные значения концентрации капролактама в полимере;

$v_{зр,max}$ и $v_{зр,min}$ – максимально и минимально возможные значения расхода;

$C_{кл,0}$ и $v_{зр,0}$ – значения концентрации мономера и расхода гранул в установившемся режиме соответственно.

Безразмерные коэффициенты передачи по остальным каналам вычисляются аналогично.

Для оценки степени связности многомерной системы наиболее широкое распространение получила методика, использующая матрицу Бристоля [3], которая характеризует степень связности в статике. В общем виде матрица записывается следующим образом:

$$\lambda = \begin{pmatrix} \lambda_{11} & \dots & \lambda_{1m} \\ \dots & \dots & \dots \\ \lambda_{m1} & \dots & \lambda_{mm} \end{pmatrix} \quad (2)$$

Элементы λ_{ij} определяются в статике по выражению:

$$\lambda_{ij} = \frac{(\partial y_i / \partial u_j)_{\text{все контуры разомкнуты}}}{(\partial y_i / \partial u_j)_{\text{все контуры, кроме } u_j, \text{ замкнуты}}}, i, j = 1, 2, \dots, m \quad (3)$$

Таким образом, каждый элемент матрицы Бристоля представляет собой отношение двух производных: одна – производная установившегося значения выхода y_i разомкнутой системы по управлению u_j , а другая – производная установившегося значения выхода y_i замкнутой системы по тому же управлению u_j . В итоге, матрицу можно получить, используя выражение:

$$\lambda = K \cdot (K^T)^{-1} \quad (4)$$

где K – матрица коэффициентов передачи.

В нашем случае матрица λ принимает следующий вид:

$$\lambda = \begin{pmatrix} 0.946 & -129.339 & -0.212 \\ 1.052 & -173.22 & 1.447 \\ 0.047 & -25.444 & 1.047 \end{pmatrix}$$

Проанализировав матрицу λ можно сделать вывод, что наш объект является связным. Следовательно, для управления реактором необходима компенсация имеющихся перекрёстных связей.

Оценка управляемости и наблюдаемости

Прежде чем приступить к этапу синтеза алгоритма управления необходимо исследовать такие свойства объекта, как устойчивость свободного движения, управляемость и наблюдаемость [3-7]. Анализ результатов данных исследований позволяет сделать вывод о принципиальной возможности процесса управления объектом. Для исследования вышеперечисленных свойств используется представление динамического объекта в пространстве состояний.

Оценка управляемости, наблюдаемости и устойчивости свободного движения объекта проводится в окрестности рабочей точки. Строгие условия управляемости и стабилизируемости найдены лишь для некоторых классов нелинейных объектов, поэтому линеаризация нелинейных уравнений объекта во многих случаях позволяет установить наличие или отсутствие указанных свойств [4]. Если в окрестности некоторого установившегося состояния линеаризованная система управляема, то делается допущение, что управляемой является и исходная нелинейная система.

Исходя из условий физической реализуемости, в качестве управляющих воздействий предварительно выбраны следующие параметры: расход гранул полимера v_{gp} , расход азота $v_{эф}$ и расход теплоносителя $v_{тн}$. Цель управления: максимально возможное на данной стадии

удаление мономера и воды из гранул полимера, а также поддержание на заданном уровне температуры содержимого реактора-дополимеризатора путём изменения регулирующих воздействий.

Линеаризация исходной нелинейной модели объекта с распределёнными параметрами в окрестности рабочей точки проводилась в пакете MATLAB с использованием расширения Simulink «Linear Analysis Tool». В результате было получено представление объекта в пространстве состояний: матрица состояния A размерностью 490×490 , матрица управления B размерностью 490×3 и матрица наблюдения C размерностью 3×490 .

Проведено исследование устойчивости невозмущённой системы в пространстве состояний. Для этого были определены собственные числа α_i матрицы A из характеристического уравнения:

$$\det(\alpha_i I - A) = 0 \quad (5)$$

где I – единичная диагональная матрица.

Расчёты показали, что все вещественные части собственных чисел матрицы состояния отрицательны. Следовательно, объект устойчив в окрестности рабочей точки и, таким образом, обладает свойством стабилизируемости [5].

Для исследования свойства управляемости необходимо располагать матрицей управляемости вида [3-7]:

$$N_y = [B : AB : A^2 B : \dots : A^{n-1} B] \quad (6)$$

где n – порядок системы.

Линейная система будет обладать свойством полной управляемости, если ранг матрицы управления будет равен порядку системы, т.е. $\text{rank}(N_y) = n$. В случае, когда $0 < \text{rank}(N_y) < n$ система будет не полностью управляемой, а если $\text{rank}(N_y) = 0$, то система будет неуправляемой. Формирование матрицы N_y и определение её ранга проводили в пакете MATLAB при помощи встроенных функций $\text{ctrb}(A, B)$ и $\text{rank}(N_y)$ соответственно. В результате вычислений ранг матрицы управляемости составил 17. Это значение меньше порядка системы (490), таким образом, что наш объект является не полностью управляемым [6, 7]. Это свидетельствует о существовании в фазовом пространстве таких начальных состояний, из которых невозможен перевод объекта в заданное конечное состояние.

Проведено исследование свойства наблюдаемости объекта. Уравнение наблюдения имеет следующий вид:

$$y = Cx \quad (7)$$

где $y=(y_1, \dots, y_m)^T$ – вектор наблюдаемых величин; $x=(x_1, \dots, x_n)^T$ – вектор переменных состояния; C – матрица наблюдения размерности $m \times n$.

Матрица наблюдаемости записывается следующим образом [3-7]:

$$N_n = \left[C^T : A^T C^T : (A^T)^2 C^T : \dots : (A^T)^{n-1} C^T \right] \quad (8)$$

где n – порядок системы.

Линейная система будет обладать свойством полной наблюдаемости, если ранг матрицы наблюдения будет равен порядку системы, т.е. $rank(N_n)=n$. С помощью встроенной функции $obsv(A, C)$ пакета MATLAB сформируем матрицу N_n , а для нахождения её ранга применим функцию $rank(N_y)$. Ранг матрицы наблюдаемости равен 19, следовательно, объект является не полностью наблюдаемым.

Был также проведён выбор каналов управления по объекту с сосредоточенными параметрами.

Используя следующее соотношение можно определить матрицу управляемости по выходам:

$$N_{вых} = \left[CB : CAB : CA^2 B : \dots : CA^{n-1} B \right] \quad (9)$$

где n – порядок системы.

Для обеспечения управляемости по выходам необходимо, чтобы выполнялось следующее условие: $rank(N_{вых})=m$, где m – это число строк матрицы наблюдения. Система управляема в пространстве выходов.

Матрица наблюдаемости имеет ранг 7, что свидетельствует о полной наблюдаемости объекта.

Далее необходимо решить задачу структурного, алгоритмического и параметрического синтеза системы управления, ориентированной на минимизацию энергозатрат на проведение процесса синтеза полиамида-6.

Литература

1. Базаров, Ю.М. Альтернативная экологически безопасная технология синтеза полиамида-6 / Ю.М. Базаров, Л.Н. Мизеровский, М.Г. Павлов // Перспективные полимерные композиционные материалы. Применение. Экология: Доклады международной конференции «Композит-2001», Саратов, 3-5 июля, 2001. Саратов: Изд-во СГТУ. – 2001. – С. 9-10.

Оценена управляемость и наблюдаемость объекта по тем же каналам управления. Матрицы состояния, управления и наблюдения имеют размерности 7×7 , 7×3 , 3×7 .

Все вещественные части собственных чисел отрицательны, поэтому можно сделать вывод об устойчивости объекта и его стабилизируемости в окрестности рабочей точки [5].

Матрица управляемости имеет максимальный ранг, равный 7. Таким образом, реактор-дополимеризатор является вполне управляемым.

2. Алексеев Е.А. Имитационное моделирование стадии синтеза поликапроамида для управления процессом его промышленного получения / Е.А. Алексеев, Б.А. Головушкин, А.Н. Лабутин, Е.В. Ерофеева // Изв. вузов. Экономика, финансы и управление производством. – 2014. – Т. 22. – Вып. 4. – С. 108-112.
3. Рей У. Методы управления технологическими процессами: Пер. с англ. М.: Мир. 1983. 368 с.
4. Пупков К.А., Егупов Н.Д. Теория оптимизации систем автоматического управления. М.: Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2004. 744 с.
5. Гудвин Г.К., Гребе С.Ф., Сальгадо М.Э. Проектирование систем управления. М.: БИНОМ. Лаборатория знаний. 2004. 911 с.;
6. Бесекерский В.А., Попов Е.П. Теория систем автоматического управления. Спб.: Профессия. 2003. 752 с.
7. Бесекерский В.А., Попов Е.П. Теория систем автоматического регулирования. М.: Наука. 1975. 768 с.