

## АДАПТИВНЫЙ АЛГОРИТМ УПРАВЛЕНИЯ ДОЗИРОВАНИЕМ РЕАГЕНТОВ ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ КАТИОННЫХ НЕФТЕПОЛИМЕРНЫХ СМОЛ

Кулаков П.А.<sup>1</sup>, Шишкина А.Ф.<sup>1</sup>, Кулакова А.Ф.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Филиал ФГБОУ ВПО Уфимский государственный авиационный технический университет в г. Стерлитамаке, Стерлитамак, Россия (453115, Республика Башкортостан, г. Стерлитамак), petr20071@mail.ru

<sup>2</sup>ООО «Газпром Межрегионгаз Уфа», филиал в г. Стерлитамаке, Стерлитамак, Россия, (453100, Республика Башкортостан, г. Стерлитамак, ул. Худайбердина, 19), kulakova.aigul@yandex.ru

В работе предлагается адаптивный алгоритм дозирования реагентов в полимеризатор, улучшающий показатели качества продукта и безопасности производства. Применяя адаптацию по величине рассогласования давления в полимеризаторе, достигаются двухступенчатая обработка исходной информации и заданная точность управления. Произведена формализация задачи синтеза регулятора. Описано нахождение вектора задания и алгоритма управления из заданного класса двухуровневых алгоритмов определенного вида. Произведен анализ отказов и инцидентов на установке и произведена их классификация по четырем основным направлениям изменения состояния полимеризатора. Алгоритм разработан на основе результатов анализа работы установки производства катионных нефтеполимерных смол с учетом статистического анализа работы установки за предыдущие годы, выявления основных слабых мест, изучения особенностей протекания происходящих химических реакций. Приведены основные формулы, описывающие кинетику химических реакций.

Ключевые слова: нефтеполимерные смолы, синтетический каучук, адаптивное управление, алгоритм, риск, анализ, безопасность.

## ADAPTIVE CONTROL ALGORITHM REAGENT DOSING IN THE PRODUCTION CATIONIC PETROLEUM RESIN

Kulakov P.A., Shishkina A.F., Kulakova A.F.

<sup>1</sup>Branch of Ufa State Aircraft Technical University in Sterlitamak, petr20071@mail.ru

<sup>2</sup>Gazprom Mezhrefiongas Ufa, kulakova.aigul@yandex.ru

This paper proposes an adaptive algorithm for chemical dosing polymerizer, improves product quality and safety. Applying adaptation largest mismatch pressure polymerization reactor achieved a two-stage processing of initial information given and the accuracy of control. The formalization of the problem of synthesis of the controller. Described finding a job and vector control algorithm mtion of specified class of two-level algorithms of some kind. The analysis of failures and incidents at the facility and their classification into four main areas polimerizatora state changes. The algorithm is based on the analysis of plants for production of cationic petroleum resins based on statistical analysis of the plant in previous years, identifying the main weaknesses of studying the flow features occurring chemical reactions. The basic formula describing the kinetics of chemical reactions.

Keywords: petroleum resins, synthetic rubber, adaptive control, an algorithm, risk, analysis, safety.

Специфика химического производства и, в частности, производства олигопипериленового синтетического каучука (СКОП – один из видов катионных нефтеполимерных смол) такова, что химические реакции, зачастую, происходят при высоких температурах и давлениях. Кроме того, в химических превращениях могут образовываться побочные вещества, представляющие опасность для окружающей среды и человека. По этим причинам химическое производство является опасным и может быть источником аварий.

В то же время олигопипериленовый синтетический каучук – востребованный продукт на рынке, поскольку является заменой дорогостоящей импортируемой твердой катионной нефтеполимерной смолы «эскорез» либо жидкой «эскопол». Оба продукта предназначены

для повышения скорости высыхания композиционных полунатуральных олиф, алкидных лаков и пигментированных лакокрасочных материалов на их основе [4].

В связи с этим проблема повышения безопасности на установках производства СКОП является актуальной. В работах [2, 5] был проведен анализ установки с точки зрения промышленной безопасности, в результате которого установлены причинно-следственные связи, представленные в виде взаимосвязей «отказы – ситуации – факторы – риски». Были выявлены 12 возможных первичных отказов, реализация которых может привести к 6 вторичным отказам. Вторичные отказы, в свою очередь, могут привести к 4 аварийным ситуациям, которые при последовательном развитии аварийной ситуации способны привести к одному или нескольким факторам риска. Возникающие риски могут относиться к экологическим, экономическим и социальным. Было выявлено, что основные опасности производства связаны с нарушением технологических параметров: повышение температуры и давления, дисбаланс состава каталитического комплекса, реакционной смеси и др.

Выявленные типовые аварийные ситуации и инциденты были классифицированы по четырем основным сценариям развития, каждый из которых ведет к экономическим потерям, связанным как с потерей качества продукции, так и с возможной порчей оборудования и экологическим ущербом.

Возможные потери в результате отказа были получены путем ориентировочных расчетов. Результаты исследований приведены в таблице 1.

Таблица 1

Потери от нежелательных событий

Наименование события	Место возникновения	Суммарные потери, руб.
1. Срабатывание мембраны	Полимеризатор	1739200
2. Срабатывание клапана	Полимеризатор	987300
3. Вспенивание и выброс продукта	Дезактиватор	81600
4. Потеря качества	В любом из аппаратов	105600

После произведения оценки возникающих рисков и анализа кинетики химических реакций в каждом из сценариев негативного развития ситуации было установлено:

- 1) при уменьшении концентрации активного каталитического комплекса или увеличении влаги выпадает осадок и реакция «садится», а при добавлении дополнительного катализатора реакция, начиная с определенной концентрации, резко возобновляется;
- 2) при чрезмерном уменьшении концентрации ацетона уменьшается количество  $R^+$ , реакция «садится», а при добавлении дополнительного ацетона реакция, начиная с определенной концентрации, резко возобновляется;
- 3) при чрезмерном увеличении ацетона происходит присоединение ацетона к  $TiCl_3OH$ .

Получившееся соединение является не активным и в реакцию не вступает, реакция «садится». При добавлении дополнительного количества катализатора реакция, начиная с определенной концентрации, резко возобновляется.

Все эти случаи приводят к тому, что процесс реакции замедляется, а карбонильные подаются с постоянной скоростью, в результате чего возможно превышение предельно допустимой концентрации мономера.

При уменьшении количества влаги или увеличении количества карбонильных также возникает вероятность превышения предельно допустимой концентрации мономера.

Таким образом, при несоблюдении точных соотношений компонентов или при попадании примесей инициализируются побочные реакции и затухают основные с накоплением не вступившего в реакцию мономера.

Кинетическая кривая расходования мономера в катионной полимеризации имеет S-образный вид, то есть эта реакция, как и горение или ядерный взрыв, протекает по цепному механизму в квазистационарном режиме. Значение эффективной константы скорости расходования мономеров  $k_{ef}$  принимает значение:

$$k_{ef} = k_{inef} \frac{k_{gr}}{k_{tr \cdot S} + k_{tr \cdot M} + a_{A^{-} \cdot S} / \gamma_{A^{-} \cdot S}}, \quad (1)$$

где  $k_{inef}$  – константа скорости лимитирующей стадии, как правило, превращение  $\pi$ - в  $\sigma$ -комплекс протона с мономером;  $k_{gr}$  – константа скорости расходования мономеров;  $k_{tr \cdot S}$  – константа скорости переноса цепи на растворитель;  $k_{tr \cdot M}$  – константа скорости переноса цепи на мономер;  $a_{A^{-} \cdot S} / \gamma_{A^{-} \cdot S}$  – активность протона;  $\gamma_{A^{-} \cdot S}$  – коэффициент активности противоиона;  $S$  – растворитель (смесь ароматического углеводорода и «мертвого» соолигомера);

$$k_{inef} = k_{in} K_b K_B h = p G_{HAS} \left( \frac{g}{p} K_b K_B \right) = k_{in} \left\{ \exp\left(-\frac{2\pi e}{h} [2m(V_0 - E^{1/2})]\right) \right\} = F \left( 1 - \exp\left(2\pi \frac{V_0 - E}{h\nu}\right) \right) [6]; \quad (2)$$

здесь  $K_b$  – константа основности ароматического углеводородного растворителя реакционной смеси катионной соолигомеризации;  $K_B$  – константа основности промотора;  $k_{in}$  – константа скорости инициирования цепи;  $G_{HAS}$ ,  $g$ ,  $p$  – функции температуры природы растворителя и мономера по Бренстеду;  $e$ ,  $V_0 - E$ ,  $m$ ,  $\nu$  – соответственно полуширина, высота потенциального барьера, масса и частота волны-частицы протона, туннелирующего между состоянием внутри мицеллы  $(HA)_n S$  и в составе сольватированного  $\sigma$  комплекса  $R_i^+ S$ ;  $h$  – постоянная Планка.

Согласно работе [5], давление в полимеризаторе и скорость подачи мономера в полимеризатор при постоянной температуре зависят друг от друга прямо пропорционально.

Масса образовавшегося за единицу времени олигомера достигает максимума в случае поддержания в реакционной смеси оптимального соотношения  $[TiCl_4] : [H_2O] + [ацетон] + [сумма других кислород- и азотсодержащих примесей]$ . В случае разбаланса оптимального состава каталитического комплекса из-за случайного попадания кислород- или азотсодержащих примесей, масса полученного олигомера снижается.

После анализа различных вариантов совершенствования установки было принято решение разработать адаптивную систему управления реактором полимеризации [1, 7].

На объект управления (ОУ) влияют измеряемые возмущения (задающие воздействия)  $Z = Z(t)$ , неизмеряемые возмущения  $N = N(t)$  и управляющие воздействия  $U = U(t)$ . Наблюдениям доступны выходные переменные объекта  $P = P_B(t)$ .

Поведение объекта зависит от ряда неизвестных параметров, совокупность которых обозначаем через  $\xi$ . Задано множество  $\Xi$  возможных значений  $\xi$ , определяющих класс допустимых объектов и возмущений. Задана цель управления, определяющая желаемое поведение ОУ.

Алгоритм 1-го уровня (алгоритм регулирования или алгоритм основного уровня) зависит от вектора параметров  $\Theta$  (вектора параметров блока задания), при каждом  $\xi \in \Xi$  он должен обеспечивать достижение ЦУ при соответствующем выборе  $Z = Z(\xi)$ . Алгоритм 2-го уровня изменяет (настраивает) вектор  $Z$  таким образом, чтобы обеспечить достижение ЦУ при неизвестном  $\xi \in \Xi$ .

Формализуем задачу синтеза. Пусть непрерывная динамическая система описывается уравнениями состояния:

$$P(t) = F(Z, N, U, \xi, t), \quad (3)$$

где  $F(\cdot)$  – известные вектор-функции;  $N_t$  – возмущения на ОУ и помехи измерений;  $X \in R^n$ ,  $U \in R^m$ ,  $P \in R^r$  – векторы состояния, управления, внешних входов и выходов ОУ соответственно.

Цель управления задается в виде целевого неравенства:

$$\varepsilon \leq \Delta \text{ при } t > t^*, \Delta \geq 0, \quad (4)$$

где  $\varepsilon(t) = \varepsilon(X(t), U(t))$  – целевая функция.

В задачах слежения в качестве целевой функции выбирается функция невязки между действительной и желаемой траекторией движения объекта  $\varepsilon$ ,  $\varepsilon(E(t), t)$ ,  $E(t) = P(i) - P_m(t)$ .

$P_m(t) = const$ , т.е. необходимо решать задачу стабилизации, и получается целевая функция текущего состояния объекта  $\varepsilon = \varepsilon(Z(t), t)$ .

Задача синтеза состоит в нахождении вектора задания  $Z$  и алгоритма управления из

заданного класса двухуровневых алгоритмов вида:

$$Z(t) = Z_i(P(t), Z_0(t), F(t)), \quad (5)$$

обеспечивающих достижение цели управления (4) в уравнении (3), для каждого  $\xi \in \Xi$ . Здесь  $U_i(\cdot)$ ,  $Z_i(\cdot)$  некоторые операторы:

$$\begin{aligned} \tau_1 \frac{d^2 Z(t)}{dt^2} + \frac{dZ(t)}{dt} &= k_1 \frac{dP(t-\tau_2)}{dt} + k_2 P(t-\tau_2); \\ P(t) &= k_3 (Z(t) - \sum_{i=1}^n \Delta_i + \sum_{j=1}^m \Delta_j); \\ \tau_3 \frac{d^2 \Delta P(t)}{dt^2} + \frac{d\Delta P(t)}{dt} &= k_4 T_1 \frac{d\varepsilon(t-\tau_3)}{dt} + k_5 \varepsilon(t-\tau_4); \\ \varepsilon(t) &= Z^o(t) - Z(t) = \sum_{j=1}^m \Delta_j - \sum_{i=1}^n \Delta_i; \\ Z(t+1) &= Z^o(t) + \sum_{i=1}^n \Delta_i - \sum_{j=1}^m \Delta_j, \\ Z(\infty) &\rightarrow \min, \\ P(\infty) &\rightarrow P_s. \end{aligned} \quad (6)$$

где  $\tau_1 \div \tau_4$  – время запаздывания прохождения информации в системе управления полимеризатором;  $K_1 \div K_5$  – коэффициенты передачи динамических звеньев системы управления полимеризатором;  $T_1$  – постоянная времени звена системы управления;  $P(t)$  – текущее значение давления в полимеризаторе.

Другими словами, необходимо подобрать минимальные значения коэффициентов расхода катализатора, мономера, промотора, при которых будет достигаться необходимое для реакции давление  $P_m$ . Именно при этих значениях будет происходить реакция, и не будет накапливаться ни один из реагентов.

Для решения поставленной задачи был разработан алгоритм адаптации [3], изображенный на рисунке 1.

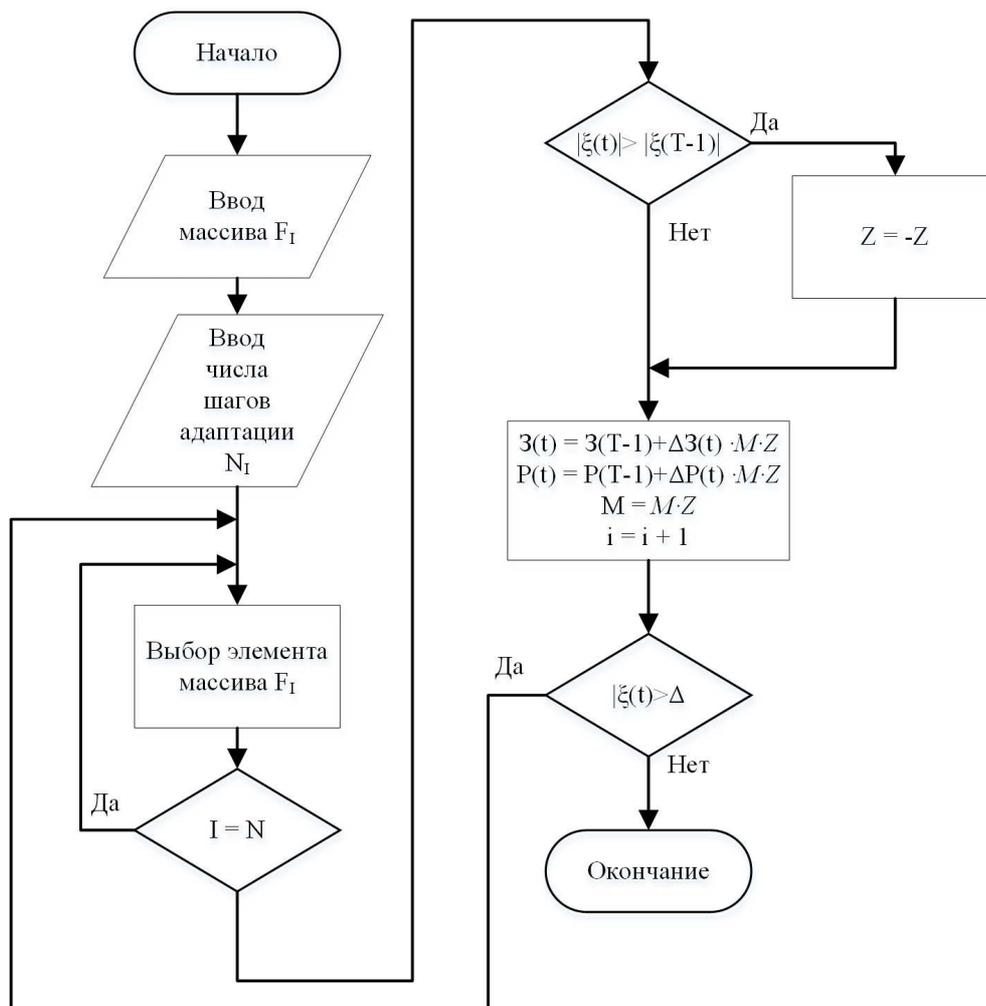


Рисунок 1. Логическая схема алгоритма адаптации работы полимеризатора по величине рассогласования давления

Из рисунка 1 следует, что процесс системы управления установкой производства СКОП происходит в следующем порядке: в течение заданного числа шагов адаптации происходит непрерывное сканирование одного из параметров адаптации – расход одного из реагентов; через заданный период непрерывного сканирования в зависимости от справедливости неравенства  $|\varepsilon(t)| > |\varepsilon(t-1)|$  переменная  $Z$  меняет знак на противоположный и выполняется функция:

$$Z_{(t+1)} = Z_t - \Delta \cdot M \cdot Z \text{ или } Z_{(t+1)} = Z_t + \Delta \cdot M \cdot Z, \quad (7)$$

а в общем случае задание регулятора в результате работы алгоритма адаптивного управления имеет следующий вид:

$$Z_{k(t+1)} = Z_{kt} + \sum_{i=1}^n \Delta_i - \sum_{j=1}^m \Delta_j, \quad (8)$$

где  $n$  – число положительных, а  $m$  – число отрицательных приращений к заданию регулятора за  $(n+m)$  периодов сканирования параметра адаптации  $k$ .

При правильном выборе значений  $\varepsilon_n$  и  $\Delta$  текущее значение  $\varepsilon$  в любой момент времени,

как следует из рисунка 1, будет находиться внутри коридора  $\pm\Delta$  и изменяться по сложному закону. Отсюда следует, что рассматриваемый контур управления работает с предельно допустимым рассогласованием, что обеспечивает максимальную производительность управляемого объекта без возникновения сбоев в системе управления, а установка производства СКОП превращается в самонастраивающуюся систему.

Для решения нестационарной задачи, в которой вектор неизвестных параметров  $\xi$  меняется во времени ( $\xi = \xi(i)$ ), разработана полная структурная схема регулятора для параметров установки производства СКОП с адаптацией по величине рассогласования, в которой приняты следующие обозначения: БАЗ – блок адаптации задания по величине рассогласования, Р – регулятор, ОУ – объект управления, БОС – блок обратной связи.

Сформулирована целесообразная программная реализация БАЗ в составе компьютерной системы управления для оперативного задания приемлемых режимов адаптации. Предельное значение рассогласования  $\varepsilon_n$  и приращение величины задания  $\Delta$  задаются в виде параметров настройки системы.

Разработанная модель работы полимеризатора позволяет автоматически контролировать уровень рассогласования в контуре обратной связи путем сравнения текущего значения рассогласований с их априорно заданным значением. В результате данная модель приобретает способность к самостоятельной настройке, что при возникновении нестандартной ситуации позволяет в режиме реального времени выявить и устранить возникшие несоответствия, а также исключить перепады давления за счет согласования скорости подачи реагентов на всех этапах работы установки производства СКОП. Таким образом, свойство самонастройки системы в целом приводит к повышению уровня безопасности рассматриваемой установки.

*Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 14-01-97032.*

### Список литературы

1. Кулаков П.А., Кулакова А.Ф., Шишкина А.Ф. Адаптивный алгоритм управления оптимизацией работы установки производства катионных нефтеполимерных смол по показателям повышения качества и безопасности // Алгоритмические и программные средства в информационных технологиях, радиоэлектронике и телекоммуникациях: сб. статей II международной заочной научно-технической конференции. / Поволжский гос. ун-т сервиса. – Тольятти: Изд-во ПВГУС, 2014. – 252 с. – С. 141–148
2. Кулаков П.А., Шарафиев Р.Г., Ризванов Р.Г. Основные этапы анализа риска установки

производства катионных нефтеполимерных смол и пути повышения безопасности // Безопасность жизнедеятельности. – 2009. – № 5. – С. 14–17.

3. Патент 79689 Российской Федерации G05B19/18 Автоматизированная система управления процессом дозирования и смешивания жидких компонентов / Б.И. Попов, П.А. Кулаков, Р.Г. Шарафиев, Р.Г. Ризванов, С.В. Ерофеев, В.В. Оpubл. 10.01.2009.

4. Попов Б.И. Производство олигопипериленового синтетического каучука (СКОП): прошлое, настоящее, будущее / Б.И. Попов, Р.Г. Шарафиев, Р.Г. Ризванов, П.А. Кулаков // Инжиниринг, инновации, инвестиции: Сборник научных трудов. Вып. 8/ Под. ред. В.В. Ерофеева. – Челябинск: Издание ЧНЦ РАЕН, РУО МАИ, ЧРО МАНПО, ЧРО МААНОИ, ЧелЦНТИ, 2006. – С. 68–71.

5. Попов Б.И., Шарафиев Р.Г., Ризванов Р.Г., Кулаков П.А. Анализ возможных опасностей при эксплуатации установки синтетического олигопипериленового каучука // Безопасность труда в промышленности. – 2006. – № 12. – С. 60–63.

6. Попов Б.И. Эффекты сопромоторов в катионной олигомеризации непредельных углеводородов / Б.И. Попов, Р.Г. Шарафиев, Р.Г. Ризванов, П.А. Кулаков // Инжиниринг, инновации, инвестиции: Сборник научных трудов, Вып. 8 / Под. ред. В.В. Ерофеева. – Челябинск: Издание ЧНЦ РАЕН, РУО МАИ, ЧРО МАНПО, ЧРО МААНОИ, ЧелЦНТИ, 2006. – С. 72–75.

7. Шарафиев Р.Г., Ризванов Р.Г., Кулаков П.А. Интегрированная автоматизированная система управления безопасностью производства СКОП // Информационные технологии в профессиональной деятельности и научной работе: Сборник материалов региональной научно-практической конференции. – Йошкар-Ола: МарГТУ, 2006. – С. 159–163.

#### **Рецензенты:**

Гималтдинов И.К., д.ф.-м.н., профессор, и.о. заведующего кафедрой прикладной информатики и программирования Стерлитамакского филиала Башкирского государственного университета, г. Стерлитамак.

Муравьева Е.А., д.т.н., доцент кафедры АТИС Филиала ФГБОУ ВПО Уфимского государственного нефтяного технического университета в г. Стерлитамаке, г. Стерлитамак.