

УДК 681.51

Профессор В.С. Кудряшов,

(Воронеж. гос. ун-т инж. технол.) кафедра информационных и управляющих систем,
тел. (473) 255-38-75

аспирант М.С. Чепелева,

(Воронеж. гос. арх.-строит. ун-т) кафедра автоматизации технологических процессов,
тел. (473) 271-70-67

доцент С.А. Ткалич,

(Воронеж. гос. технич. ун-т) кафедра автоматики и информатики в технич. системах
тел. (473) 243-77-20

Прогнозирование аварийной ситуации в условиях неопределенности при управлении процессом полимеризации синтетического каучука

Предложен метод прогнозирования, основанный на совместной оценке показателя Херста и текущей ситуации на потенциально опасном объекте с учетом ее неопределенности. Полученный показатель прогноза позволяет заранее предупредить оператора о возможном переходе системы в аварийное состояние и дает ему дополнительное время на принятие управленческих решений.

This paper proposes a method of forecasting based on a joint assessment of Hurst exponent and the current situation on the potentially dangerous object because of its uncertainty. The resulting index allows prediction of pre-warn the operator of a possible transition of the system in emergency stat, the achieved prediction gives the operator extra time to make management decisions.

Ключевые слова: система прогнозирования, R/S-анализ, полимеризация.

Среди множества процессов различных технологий выделяется класс потенциально опасных, которые в условиях нарушения требований регламента выходят в аварийные режимы различной степени тяжести. Кроме того, существуют системы, в которых дополнительные трудности в процесс управления вносит наличие неопределенностей различного рода. Одним из процессов нефтехимической отрасли, характеризующихся потенциальной опасностью и обладающих рядом неопределенностей, является полимеризация синтетического каучука (СК) в растворе.

Несмотря на высокий уровень системы автоматизации большинства предприятий данной отрасли, учитывая лавинообразный характер процесса полимеризации при приближении к зоне аварийности, необходимо разработать систему прогнозирования, способную заблаговременно предупредить лицо, принимающее решения (ЛПР), о возможном выходе системы за рамки штатной ситуации. Благодаря полученному прогнозу ЛПР сможет предпринять действия по возврату объекта в нормальный режим функционирования или, если это

невозможно, заблаговременно остановить процесс, что повысит уровень безопасности производства и позволит избежать материальных и энергетических затрат на ведение процесса, останов которого неизбежен.

Неопределенности ситуаций процесса полимеризации. Для установления степени определенности текущей ситуации на объекте рассмотрим все возможные состояния, в которых может оказаться потенциально опасная система.

Анализ существующих классификаций состояний потенциально опасных процессов показал, что помимо частных, разработанных для конкретных объектов и задач [1], существует наиболее общая и универсальная классификация (рис. 1). В режиме нормального функционирования выделяют три состояния:

- нормальное протекание процесса при соответствии значений определяющих параметров установленному заданию (I-б);
- отклонение определяющих параметров в сторону уменьшения опасности (I-а), не выходящее за рамки заданного диапазона;

- отклонение определяющих параметров в сторону увеличения опасности (I-в), не выходящее за рамки заданного диапазона.

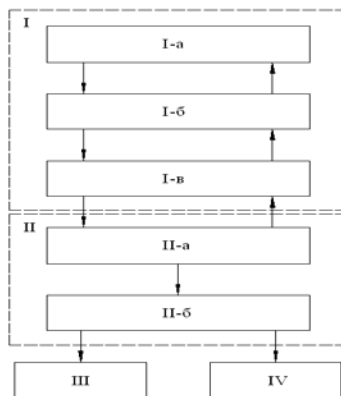


Рис. 1. Состояния потенциально опасного объекта и связи между ними: I – нормальное функционирование: I-а – отклонение в сторону уменьшения опасности, I-б – нормальный режим, I-в – отклонение в сторону увеличения опасности; II – предаварийное состояние: II-а – возможен возврат к нормальному функционированию, II-б – возврат к нормальному функционированию невозможен; III – останов процесса; IV – аварийное состояние

Режим I является зоной действия нижнего уровня системы управления. Работы локальных регуляторов достаточно для поддержания параметров объекта на должном уровне несмотря на возмущающие воздействия стохастического характера.

При возникновении значительных отклонений определяющих параметров от заданных пределов в сторону увеличения опасности процесс переходит в предаварийное состояние, в котором выделяют две фазы: в первой фазе (II-а) возможен возврат процесса к нормальному режиму, во второй (II-б) развитие аварийной ситуации становится необратимым, и вывести процесс на нормальный режим не представляется возможным. В последнем случае необходимо прекратить ведение процесса (III).

Отметим, что возврат из ситуации II-а к нормальному функционированию только с использованием возможностей регуляторов нижнего уровня системы управления неэффективен, т.к. предаварийное состояние возникает в результате воздействий возмущений (или их совокупностей), не предусмотренных на этапе проектирования. В связи с этим решение задачи возврата процесса к нормальному режиму ложится на ЛПР.

Неизбежное развитие предаварийной ситуации с переходом ее в аварийную (IV), сопровождающуюся последствиями различной степени тяжести, происходит, если вовремя не принять меры по возврату процесса к нормальному функционированию или, если это невозможно, не прибегнуть к экстремному останову.

В качестве предприятия для опытного внедрения было выбрано ООО «Тольятти-каучук». Технологический процесс, для которого разработана система прогнозирования, – синтез бутылкаучука.

В регламенте исследуемого технологического процесса указано, что при температуре реакции выше -50°C необходимо остановить процесс, т.е. такое состояние соответствует ситуации II-б. При температуре выше -45°C наступает аварийное состояние IV. Рабочей температурой является -60°C , что подобно ситуации I-б. Зона между температурами -50 и -60°C не описана в регламенте и по универсальной классификации соответствует одновременно двум состояниям с отсутствием четкой границы между ними: нормальное функционирование с отклонением в сторону увеличения опасности и предаварийное состояние с возможностью возврата в нормальный режим.

Учитывая неопределенность в описании текущей ситуации на объекте, для построения системы прогнозирования необходимо решить две задачи:

- определить тенденции поведения процесса;
- совместно рассмотреть показатель прогноза развития ситуации и текущего состояния системы.

Определение тенденций поведения процесса. Одним из способов определения тенденций систем является применение R/S-анализа [2]. При этом изменение прогнозируемого технологического параметра во времени рассматривается как обобщенное броуновское движение [3], введенное Мандельбротом, которое описывается следующим выражением:

$$B_H(t) - B_H(t-1) = \frac{n^{-H}}{\Gamma(H+0,5)} \times \left\{ \sum_{i=1}^m (i)^{H-0,5} \xi_{(1+n(M+t)-i)} + \sum_{i=1}^{n(M-1)} ((n+i)^{H-0,5} - i^{H-0,5}) \xi_{(1+n(M-1+t)-i)} \right\}$$

где $B_H(t)$ – обобщенная броуновская функция; $\Gamma(x)$ – гамма-функция; $\{\xi_i\}$ с $i=1,2,\dots,M,\dots$ – набор Гауссовых случайных чисел с единичной дисперсией и нулевым средним; n – количество шагов численного интегрирования на интервале $\Delta t=[t-1;t]$, причём t здесь принимает целочисленные значения; M – количество интервалов Δt , анализируемых в процессе прогнозирования; H – показатель персистентности (или показатель Херста), принимающий значения в интервале $[0;1]$.

Показатель Херста определяется в результате R/S-анализа, который имеет следующий алгоритм [4].

1. В ходе технологического процесса через определенные промежутки времени Δt снимаются данные о прогнозируемом параметре. Таким образом, формируется временной ряд M длины m , который необходимо преобразовать в ряд приращений N длиной $m-1$ по формуле

$$N_i = M_{i+1} - M_i, \quad i = 1, 2, 3, \dots, (m-1).$$

2. Полученный ряд N делится на A смежных подпериодов длины n , так что $An=N$. Каждый подпериод помечается как I_a , где $a=1,2,3,\dots,A$. Каждый элемент I_a помечен как N_k , при этом $k=1,2,3,\dots,n$.

3. Для каждого I_a длины n определяется среднее значение e_a по формуле

$$e_a = (1/n) \sum_k N_{k,a}.$$

4. Определяется временной ряд накопленных отклонений $X_{k,a}$ от среднего значения для каждого подпериода I_a по формуле

$$X_{k,a} = \sum_{i=1}^k (N_{i,a} - e_a), \quad k = 1, 2, 3, \dots, n.$$

Обратим внимание, что $X_{k,a}$ для любого a при $k=n$ всегда равно нулю.

5. Размах определяется как максимальное значение за вычетом минимального значения $X_{k,a}$ в пределах каждого подпериода I_a :

$$R_{I_a} = \max(X_{k,a}) - \min(X_{k,a}), \quad \text{где } 1 \leq k \leq n.$$

Поскольку X_a скорректирован к среднему нулю, максимальное значение $X_{k,a}$ всегда будет больше или равно нулю, а минимальное значение всегда будет меньше или равно нулю. Следовательно, размах всегда является неотрицательной величиной.

6. Для каждого периода I_a рассчитывается стандартное отклонение по формуле

$$S_{I_a} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{k=1}^n (N_{k,a} - e_a)^2}.$$

7. Каждый размах R_{I_a} нормируется путем деления на соответствующее значение стандартного отклонения S_{I_a} , при этом для каждого подпериода I_a получаем определенное соотношение R_{I_a} / S_{I_a} .

8. Определяется среднее значение R / S для данного n :

$$(R / S)_n = (1 / A) \sum_{a=1}^A (R_{I_a} / S_{I_a}).$$

9. Ряд N делится на следующее меньшее целое значение A , такое, что n – целочисленное значение. Шаги с 3-го по 8-й повторяются. Деление ряда продолжается до $n=(m-1)/2$.

10. Показатель Херста определяется исходя из формулы:

$$(R / S)_n = (c \cdot n)^H,$$

где c – константа; H – показатель Херста; R / S – нормированный размах; n – число наблюдений.

Логарифмируя данное выражение, получим:

$$\log((R / S)_n) = H(\log(n) + \log(c)).$$

Методом наименьших квадратов определяется прямая, аппроксимирующая зависимость $\log((R / S)_n)$ от $\log(n)$. Наклон данной прямой и характеризует показатель Херста. Полученное значение показателя H сравнивается с величиной 0,5, после чего делаются следующие выводы о тенденциях системы:

$0,50 < H \leq 1,00$ – анализируемый временной ряд персистентен и характеризуется эффектом долговременной памяти, т.е. если ряд возрастает (убывает) в предыдущий период, то вероятно, что он будет сохранять эту тенденцию какое-то время в будущем. Тренды очевидны, и система стремится сменить свое текущее состояние на иное.

$H = 0,50$ – имеет место случайный процесс с независимыми приращениями.

$0 \leq H < 0,50$ – анализируемый временной ряд антиперсистентен. В этом случае рост в прошлом означает вероятное

уменьшение в будущем и наоборот. Система стремится сохранить свое текущее состояние.

Следует отметить, что суждение по данному показателю о возможном поведении системы носит вероятностный характер. При этом вероятность продолжения движения в прежнем направлении тем выше, чем ближе H к единице, а вероятность возврата к среднему увеличивается с приближением H к нулю.

Описанный алгоритм R/S-анализа позволяет получить показатель Херста (и, следовательно, прогноз) однократно в конкретный момент времени, т.е. в статике. Учитывая, что анализируемый параметр непрерывно меняется, показатель прогноза также следует рассматривать в динамике. Для этого в ходе технологического процесса первоначальный временной ряд сдвигается и анализируется заново по мере поступления новых значений прогнозируемого параметра. Данный алгоритм показан на рис. 2.

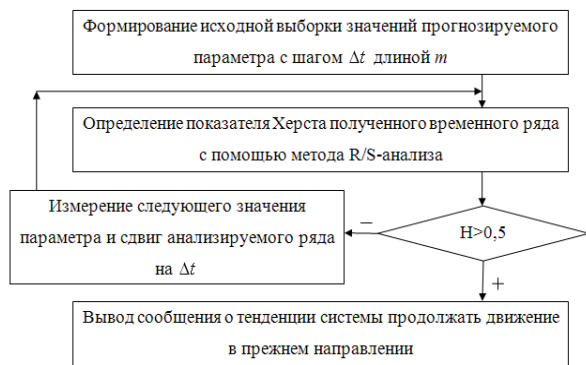


Рис. 2. Блок-схема системы прогнозирования тенденции процесса

Для проведения R/S-анализа реальная выборка значений температуры реакции полимеризации бутилкаучука, полученная на ООО «Тольяттикаучук», представлена на рис. 3.

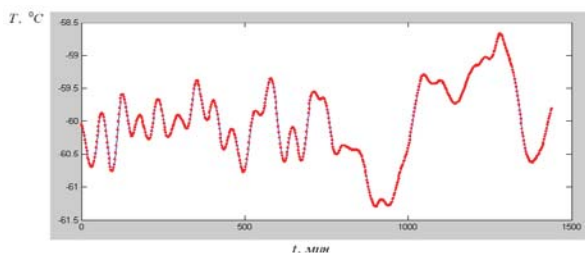


Рис. 3. Экспериментальная выборка

Значения показателя H (рис. 2) отражены на рис. 4.

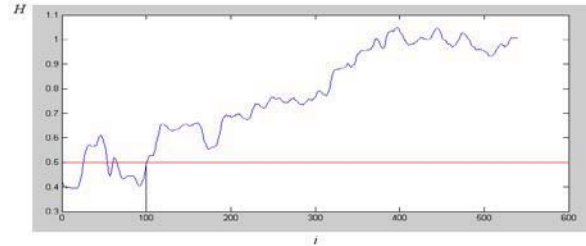


Рис. 4. Значения показателя Херста в ходе технологического процесса

Из рис. 4 видно, что величина H превысила отметку 0,5 на значении $i = 100$ точкам и больше за нее не опускалась, т.е. после прохождения этого рубежа по полученному параметру можно дать прогноз о том, что система будет стремиться перейти в состояние, отличное от текущего. Действительно, по исходной экспериментальной выборке (рис. 3) видно, что с течением времени динамика системы изменилась, появились устойчивые тренды, и система способна сменить свое текущее состояние на иное. Однако абсолютное значение температуры реакции незначительно отклоняется от номинального, и ЛПР не следует вмешиваться в процесс управления.

Для получения более объективного параметра прогноза разработан метод, позволяющий учитывать как показатель Херста, так и текущую ситуацию на объекте.

Метод совместного рассмотрения показателя прогноза и текущей ситуации на объекте. В связи с вероятностным характером показателя Херста и наличием неоднозначностей в описании текущей ситуации в системе для решения поставленной задачи целесообразно использовать аппарат нечеткой логики. В качестве выхода системы нечеткого вывода принят параметр F – показатель близости к аварийному состоянию. Значение $F=1$ соответствует наступлению предаварийной ситуации без возможности возврата к нормальному функционированию. С этого момента управление передается алгоритмам экстренного останова.

Определим множество входных и выходных лингвистических переменных и составим базу правил нечетких продукций.

Множество входных лингвистических переменных

Запас по температуре (характеристика текущей ситуации) – ET:

- очень большой $\rightarrow$ VB,
- большой $\rightarrow$ B,
- средний $\rightarrow$ S,
- маленький $\rightarrow$ L,

- очень маленький $\rightarrow VL$,
 $ET = \{VB, B, S, L, VL\}$.

Показатель Херста (прогноз на тенденцию процесса) – H :

- очень большая вероятность возврата к среднему $\rightarrow VVB$,
 - большая вероятность возврата к среднему $\rightarrow VVL$,
 - процесс хаотичен $\rightarrow X$,
 - большая вероятность соблюдения тенденции $\rightarrow STL$,
 - очень большая вероятность соблюдения тенденции $\rightarrow STB$,
- $H = \{VVB, VVL, X, STL, STB\}$.

Множество выходных лингвистических переменных

Показатель близости аварии – F :

- вероятность очень низкая $\rightarrow VM$,
 - вероятность низкая $\rightarrow M$,
 - вероятность средняя $\rightarrow S$,
 - вероятность большая $\rightarrow B$,
 - вероятность очень большая $\rightarrow VB$,
- $F = \{VM, M, S, B, VB\}$.

Множество правил нечетких продукций

Для удобства записи используем сокращения для наименования отдельных термов входных и выходных лингвистических переменных, принятые выше. Фрагмент базы правил:

ЕСЛИ VVB И VB, ТО VM,
ЕСЛИ VVB И B, ТО VM,
 $\vdots$
ЕСЛИ STB И VL, ТО VB.

На рис. 5 представлены терм-множества входных и выходных лингвистических переменных, построенных с помощью треугольных функций принадлежности.

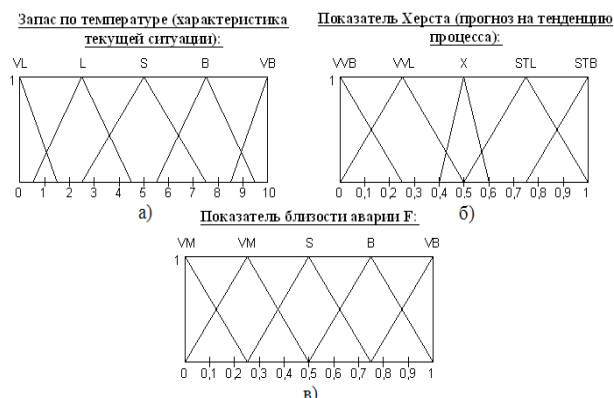


Рис. 5. Терм-множества входных (а, б) и выходных (в) лингвистических переменных системы нечеткого вывода

Полученная поверхность нечеткого вывода представлена на рис. 6.

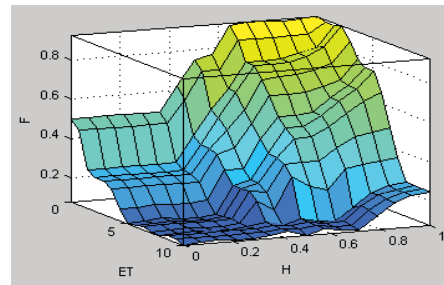


Рис. 6. Поверхность вывода выходной лингвистической переменной F

Полученный в результате эксперимента показатель близости к аварии дан на рис. 7.

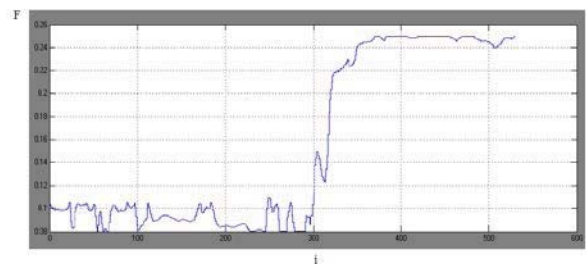


Рис. 7. Показатель близости к аварии

Из рис. 7 видно, что возможность перехода в аварийное состояние возросла, однако, так как текущая ситуация на объекте с большой вероятностью характеризовалась как нормальное функционирование, возможностей системы управления нижнего уровня и ЛПР, а также времени на реализацию этих возможностей было достаточно, чтобы система не перешла в аварийный режим. Адекватность прогноза доказывается тем, что во время получения экспериментальной выборки и после этого на объекте не происходило аварийных ситуаций.

ЛИТЕРАТУРА

1. Русинов, Л.А. Обнаружение нештатных ситуаций при оперативном управлении химико-технологическими процессами [Текст] / Л.А. Русинов, И.В. Рудакова, В.В. Куркина // Автоматизация и современные технологии. – 2007. – № 6. – С. 40 – 45.
2. Ткалич, С.А. Исследование системы прогнозирования аварийных ситуаций на базе термодинамической модели [Текст] / С.А. Ткалич // Системы управления и информационные технологии. – 2008. – № 3.3. (33). – С. 399 – 403.
3. Ткалич, С.А. Термодинамический подход к прогнозированию аварийных ситуаций [Текст] / С.А. Ткалич // Системы управления и информационные технологии. – 2008. – № 3.1. (33). – С. 200 – 204.
4. Петерс, Э. Фрактальный анализ финансовых рынков: применение теории хаоса в инвестициях и экономике [Текст] / Э. Петерс. – М.: Интернет-трейдинг, 2004. – 304 с.