

УДК 62-50:004

ПОСТРОЕНИЕ СИТУАЦИОННОЙ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ НА ОСНОВЕ СЛАБОФОРМАЛИЗОВАННЫХ ЗНАНИЙ ЭКСПЕРТОВ ДЛЯ РАСПОЗНАВАНИЯ ПРЕДАВАРИЙНЫХ СИТУАЦИЙ ОПАСНЫХ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ОБЪЕКТОВ

Антонов О.В., Райкова Е.Ф.

*ФГБОУ ВО «Астраханский государственный технический университет», Астрахань,
e-mail: o_antonov@mail.ru*

Для снижения риска возникновения аварийных ситуаций опасных производственных объектов предложена система, способная идентифицировать предаварийные ситуации на объекте до момента их развития в аварийные, а также формировать управляющие воздействия для возврата объекта в режим нормальной эксплуатации. Идентификация предаварийных ситуаций для технологических объектов реализуется как задача распознавания технологической ситуации на основе ситуационной математической модели объекта. Рассмотрена методика построения ситуационной математической модели для идентификации предаварийных ситуаций в виде массива продукционных правил, отображающих знания экспертов об идентификации предаварийных ситуаций на объекте. Рассмотрены особенности формирования правил ситуационной математической модели при обработке слабо формализованных знаний экспертов. Предложен вычисляемый критерий общей оценки ситуации на технологическом объекте на основе частных значений лингвистических переменных описания ситуации. Практическое применение способа идентификации предаварийных ситуаций рассмотрено для процесса первичной сепарации нефти. Приведен пример анализа факторов безопасности и продукционных правил ситуационной математической модели для трёхфазного сепаратора процесса первичной сепарации нефти. Эффективность подхода оценена путем моделирования системы по архивным данным системы управления технологическим процессом первичной сепарации нефти. Показано, что использование предложенной системы позволит повысить безопасность и устойчивость функционирования опасных производственных объектов.

Ключевые слова: опасный производственный объект, ситуационная математическая модель, предаварийная ситуация, идентификация предаварийных ситуаций, метод идентификации предаварийных ситуаций

CONSTRUCTION OF A SITUATIONAL MATHEMATICAL MODEL ON THE BASIS OF WEAKLY FORMALIZED EXPERTS' KNOWLEDGE FOR RECOGNITION OF PRE-ACCIDENT SITUATIONS OF HAZARDOUS PRODUCTION FACILITIES

Antonov O.V., Raykova E.F.

Astrakhan State Technical University, Astrakhan, e-mail: o_antonov@mail.ru

To reduce the risk of emergencies at hazardous production facilities, a system is proposed that is able to identify pre-emergency situations at the facility until they develop into emergency situations, as well as form control actions to return the facility to normal operation. Identification of pre-emergency situations for technological objects is implemented as a task of recognizing a technological situation based on a situational mathematical model of an object. A technique for constructing a situational mathematical model for identifying pre-emergency situations in the form of an array of production rules that reflect the knowledge of experts about the identification of pre-emergency situations at the facility is considered. The features of the formation of the rules of a situational mathematical model in the processing of weakly formalized expert knowledge are considered. A calculated criterion for a general assessment of the situation at a technological object based on particular values of the linguistic variables of the situation description is proposed. The practical application of the method for identifying pre-emergency situations is considered for the process of oil separation. An example of the analysis of safety factors and production rules of a situational mathematical model for a three-phase separator of the oil separation process is given. The effectiveness of the approach was evaluated by modeling the system according to the archived data of the control system for the technological process of oil separation. It is shown that the use of the proposed system will improve the safety and stability of the operation of hazardous production facilities.

Keywords: situational mathematical model, pre-emergency situation, identification of pre-emergency situations, method of identification of pre-emergency situations

Проблема обеспечения технической безопасности затрагивает практически все аспекты эксплуатации технологического оборудования. Традиционные методы обеспечения безопасности часто не соответствуют уровню потенциальной угрозы опасных производственных объектов. К их существенным недостаткам можно

отнести: отсутствие системности в организации безопасной эксплуатации технологических объектов, низкий уровень информационного обеспечения задач безопасности, отсутствие научно обоснованных методов и несовершенство критериев оценки состояния технологического процесса и оборудования.

В современных системах управления технологическими процессами обеспечение безаварийности чаще всего осуществляется на основе систем предупредительной сигнализации и противоаварийной защиты, которые опираются на контроль нахождения технологических параметров в допустимых диапазонах. Данный подход не позволяет учитывать ситуации, при которых все технологические параметры находятся в допустимом диапазоне, но их сочетание указывает на развитие аварийной ситуации. Также при этом не учитывается скорость изменения параметров, которая, даже при нахождении параметра в допустимом диапазоне, может указывать на неблагоприятную динамику процесса. Вместе с тем опытные операторы могут распознавать такие ситуации и заблаговременно предпринимать необходимые действия для нормализации технологического процесса.

Целью исследования является повышение безопасности и устойчивости функционирования опасных производственных объектов путем применения ситуационной математической модели объекта с возможностью идентификации предаварийных ситуаций технологического процесса на основе слабоформализованных знаний экспертов.

Материалы и методы исследования

Состояние технологического объекта с неблагоприятным сочетанием значений или неблагоприятной динамикой изменения значений параметров процесса при отсутствии признаков аварийной ситуации можно назвать предаварийной ситуацией [1]. В ряде случаев при этом существует возможность предпринять управляющие действия, способные вернуть технологический объект в режим нормальной эксплуатации до срабатывания системы противоаварийной защиты и тем самым предотвратить его аварийную остановку [2, 3].

Идентификация предаварийных ситуаций для технологических объектов реализуется как задача распознавания технологической ситуации на основе ситуационной математической модели объекта. В общем случае ситуационная математическая модель SMM представляется в следующем виде:

$$SMM = \langle S, I, \{A \rightarrow B\}, Q \rangle,$$

где S – набор идентифицируемых ситуаций; I – входной набор индикаторов состояния объекта; $\{A \rightarrow B\}$ – массив продукционных правил, Q – выходной набор активаторов объекта.

Массив продукционных правил $\{A \rightarrow B\}$ идентификации предаварийных ситуаций и выбора траектории возврата объекта в режим нормальной эксплуатации формируется на основе имеющихся знаний экспертов и группируется по трем уровням безопасности:

$$\{A \rightarrow B\} = \langle \{A \rightarrow B\}_1, \{A \rightarrow B\}_2, \{A \rightarrow B\}_3 \rangle.$$

Продукционные правила первого уровня $\{A \rightarrow B\}_1$ строятся для идентификации ситуаций нарушения режима нормальной эксплуатации и соответствуют системе предупредительной сигнализации, правила третьего уровня $\{A \rightarrow B\}_3$ идентифицируют аварийные ситуации и соответствуют системе противоаварийной защиты.

В качестве антецедентной части A правил первого и третьего уровней вводятся наборы индикаторов состояния объекта I , соответствующие текущим значениям технологических параметров по отношению к установленным пороговым значениям параметров, в качестве консеквентной части B указывается описание состояния объекта S^* в классе ситуаций

$$S = \langle \text{"нормальный режим"}, \text{"нарушение режима"}, \text{"аварийная ситуация"} \rangle$$

и активатор Q^* траекторий перевода в режим нормальной эксплуатации или отказа:

$$\begin{aligned} & \text{ЕСЛИ}(X_i \text{ REL}_i \text{ Limit}\{X_i\}_k, i \in 1 \dots N) \\ & \text{ТО (Ситуация } S^*, \text{ активатор } Q^*), \end{aligned}$$

где X_i – технологический параметр i -го индикатора, REL_i – условие отношения i -го индикатора ($>/</=$), $\text{Limit}\{X_i\}_k$ – пороговое значение для параметра X_i по уровню безопасности k , N – количество индикаторов правила.

Для учета динамики технологического объекта при формировании правил второго уровня $\{A \rightarrow B\}_2$ для класса ситуаций

$$S = \langle \text{"нормальный режим"}, \text{"предаварийная ситуация"} \rangle$$

в качестве антецедентной части A дополнительно вводятся наборы рассчитываемых индикаторов, определяющие скорость изменения значений технологических параметров:

$$\begin{aligned} & \text{ЕСЛИ}(X_i \text{ REL}_i \text{ Limit}\{X_i\}_2, \\ & \text{И } v(X_i) \text{ REL}_i \text{ Limit}\{v(X_i)\}_2, i \in 1 \dots N) \\ & \text{ТО (Ситуация } S^*, \text{ активатор } Q^*), \end{aligned}$$

где $v(X_i)$ – рассчитываемая текущая скорость изменения технологического параметра i -го индикатора, $\text{Limit}\{v(X_i)\}_2$ – пороговое значение для скорости изменения параметра X_i по второму уровню безопасности.

В отличие от правил первого и третьего уровней, входные индикаторы, в составе антецедентов которых задаются требованиями технического регламента технологического объекта, при формировании правил второго уровня на основании знаний привлекаемых экспертов часто возникают затруднения, связанные с лингвистической неопределенностью качественной оценки параметров и отношений параметров на естественном языке.

Разрешение такого рода неопределенности при формализации экспертных знаний предлагается производить с помощью представления исходных лингвистических выражений как отношения значений лингвистических переменных на основе теории приближенных рассуждений и теории нечетких множеств.

Следуя принятому математическому аппарату, для описания входов ситуационной математической модели используются лингвистические переменные. На основе априорной информации для каждой входной переменной X устанавливается диапазон изменения величины $X_{\min} - X_{\max}$, соответствующий множеству $\{x_1 \dots x_n\}$, которое проецируется на универсальное множество $U = \{u_1 \dots u_n\}$ как

$$x_i = u_i \frac{(X_i - X_{\max})}{X_{\max} - X_{\min}} + X_{\min}.$$

Лингвистическая переменная определяется как нечеткое множество $L\{X\}$ на универсальном множестве U как

$$L\{X\} = \{\mu_1 / u_1 \dots \mu_n / u_n\},$$

где μ_i – функция принадлежности элемента u_i нечеткому множеству $L\{X\}$, $0 \leq \mu_i \leq 1$.

При этом каждое априорно определенное значение лингвистической переменной представляет собой нечеткое подмножество базового множества (первичный терм) $L\{X\}^k$:

$$L\{X\}^k = \{\mu_1^k / u_1 \dots \mu_n^k / u_n\}.$$

Набор ситуаций S также определяется как значения лингвистической переменной в виде первичных термов $L\{S\}^k$ на универсальном множестве U .

В качестве формализованного математического описания продукционного правила второго уровня $\{A \rightarrow B\}_2$ для ситуации S^* , заданной в виде первичного термина $L\{S\}^*$ используется матрица нечеткого отношения R , вычисление которой производится следующим образом:

$$R = \left(\sum L\{X\}^k \times L\{S\}^*, \forall L\{X\}^k \in A \right) + \left(\sum HE(L\{X\}^k) \times L\{S\}^*, \forall L\{X\}^k \notin A \right).$$

На эксплуатационном этапе расчет по матрице R производится с использованием операции минимаксной композиции:

$$\{S\} = FUZZY(X) \otimes R,$$

где $FUZZY(X)$ – фазсифицированное значение входной переменной X .

Общая оценка текущей ситуации на технологическом объекте формируется путем расчета показателя Sit принадлежности состояния объекта ситуации S^* консеквента V группы правил как логической композиции элементов частных значений $\{S\}_i$ и определения интегрального значения актуальности консеквентной части правил:

$$Sit = \frac{\int_0^{U_{\max}} \left(\bigcup_{i=1}^N \{S\}_i \cap \{S^*\} \right) dU}{\int_0^{U_{\max}} \{S^*\} dU},$$

где N – количество групп антецедентов используемых правил идентификации $\{A \rightarrow B\}_i$.

Графическая интерпретация расчета показателя Sit для $S = \{\text{«предварийная ситуация»}\}$ и трех частных значений $\{S\}_i$ на универсальном множестве $U = \{0..9\}$ приведена на рис. 1.

В зависимости от значения показателя состояния Sit выделены следующие состояния объекта: $Sit < Sit_{\text{нп}}$ – режим нормальной эксплуатации; $Sit > Sit_{\text{нп}}$ – предаварийная ситуация. Выбранное значение $Sit_{\text{нп}}$ ($0 < Sit_{\text{нп}} < 1$) определяет чувствительность системы.

Практическое применение предложенного способа идентификации предаварийных ситуаций рассмотрено для процесса первичной сепарации нефти ледостойкой стационарной платформы месторождения им. Ю. Корчагина в Каспийском море. В ходе технологического процесса производится четырехступенчатая сепарация нефти с промежуточными подогревами для выделения пластовой воды и попутного газа. Обессоливание и окончательное обезвоживание до содержания воды не более 0,5% осуществляется с помощью электродегидраторов. Установка подготовки нефти является опасным производственным объектом в соответствии с приложением № 1 к Федеральному закону № 116-ФЗ [4], так как характеризуется образованием горючих жидкостей и газов (п. 1) и использованием оборудования, работающего под избыточным давлением более 0,07 МПа (п. 2).

В качестве примера рассмотрено построение правил ситуационной математической модели для трехфазного сепаратора третьей ступени сепарации V-2003.

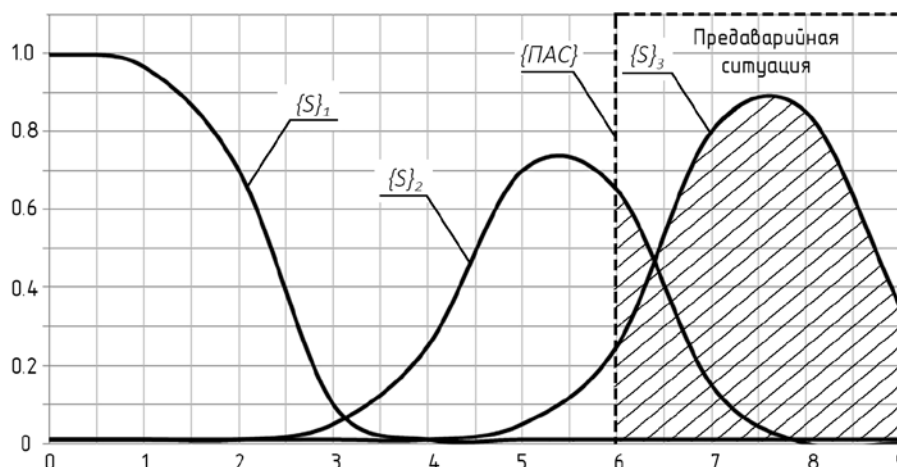


Рис. 1. Логическая композиция элементов итоговых значений функций принадлежности и определение итогового значения показателя состояния

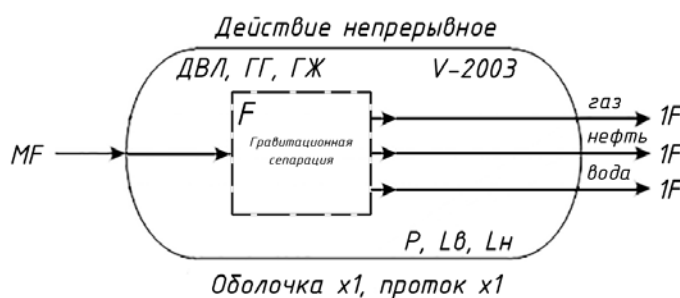


Рис. 2. Схема анализа факторов безопасности трёхфазного сепаратора нефти

Сепаратор рассматривается как конструктивно замкнутый и технологически проточный емкостный аппарат, работающий под давлением 0,6 МПа, непрерывного действия с одним мультифазным притоком и тремя монофазными стоками, с технологическим процессом на физических принципах (гравитационная сепарация) без изменения агрегатного состояния веществ, с тремя контурами регулирования (давление P^{V2003} в аппарате, уровень воды в 1-й секции фаз L_1^{V2003} , уровень отсепарированной нефти во 2-й секции L_2^{V2003}).

Схема анализа факторов безопасности трёхфазного сепаратора V-2003 [5] приведена на рис. 2.

Для правил первого уровня $\{A \rightarrow B\}_1$ использованы установленные технологическим регламентом некритичные отклонения параметров P^{V2003} , L_1^{V2003} , L_2^{V2003} в пределах аварийных уставок («Нарушение режима»), для правил третьего

уровня $\{A \rightarrow B\}_3$ отклонения параметров P^{V2003} , L_6^{V2003} , L_n^{V2003} с выходом за пределы аварийных уставок и требующие остановки аппарата («Аварийная ситуация»).

Пример реализации правил первого и третьего уровней с прямыми условиями по значениям технологических параметров:

$V2003-1/1$: (ЕСЛИ $P^{V2003} > P_{1/1}^{V2003}$),
ТО (Ситуация «Повышение давления V2003»)

$V2003-3/1$: (ЕСЛИ $P^{V2003} > P_{3/1}^{V2003}$),
ТО (Ситуация «Аварийное повышение давления, остановка аппарата V2003»,
Активатор «Аварийный сброс газа V-2003 на факел», Активатор
«Закрытие отсечных клапанов V-2003»)

Для правил второго уровня $\{A \rightarrow B\}_2$ использованы предложенные экспертами предаварийные ситуации, потенциально приводящие к аварии: изменение параметров P^{V2003} , L_6^{V2003} , L_n^{V2003} с прогнозом выхода за пределы аварийных уставок.

Для обработки значений параметров производственными правилами на базе процедуры нечеткого вывода значения нормируются и фазсифицируются на универсальном нечетком множестве $U = \{0 \dots 9\}$. Термы для лингвистического описания ситуаций и переменной «Скорость изменения параметра» определены как нечеткие множества:

$$\{\text{«нормальный режим»}\} = \{1/0, 1/1, 1/2, 1/3, 1/4, 1/5, 0/6, 0/7, 0/8, 0/9\}$$

$$\{\text{«предавварийная ситуация»}\} = \{0/0, 0/1, 0/2, 0/3, 0/4, 0/5, 1/6, 1/7, 1/8, 1/9\}$$

$$\{\text{«НИЗКАЯ»}\} = \{1.00/0, 0.95/1, 0.75/2, 0.30/3, 0.10/4, 0.05/5, 0/6, 0/7, 0/8, 0/9\}$$

$$\{\text{«СРЕДНЯЯ»}\} = \{0/0, 0/1, 0.30/2, 0.85/3, 1.00/4, 0.85/5, 0.30/6, 0/7, 0/8, 0/9\}$$

$$\{\text{«ВЫСОКАЯ»}\} = \{0/0, 0/1, 0/2, 0/3, 0/4, 0.10/5, 0.30/6, 0.75/7, 0.95/8, 1.00/9\}$$

В качестве примера приведено лингвистическое описание и формализованный вид правила V2003-2/1 идентификации предаварийной и предотвращения аварийной ситуации по возможному аварийному повышению давления в аппарате V-2003.

Если «Давление в сепараторе V-2003» ВЫШЕ НОРМАЛЬНОГО и «Скорость изменения давления в сепараторе V-2003» ВЫСОКАЯ или «Давление в сепараторе V-2003» ВЫШЕ НОРМАЛЬНОГО и «Скорость изменения давления в сепараторе V-2003» СРЕДНЯЯ, то возможна предаварийная ситуация «Аварийное повышение давления V-2003», предотвращается сбросом газа из сепаратора на факел без остановки аппарата.

*V2003-2/1: (ЕСЛИ $P^{V2003} > P_{1/1}^{V2003}$ И ЕСЛИ $v(P^{V2003}) = \text{«ВЫСОКАЯ»}$)
ИЛИ (ЕСЛИ $P^{V2003} > P_{1/1}^{V2003}$ И ЕСЛИ $v(P^{V2003}) = \text{«СРЕДНЯЯ»}$),
ТО (Ситуация «Предавварийное повышение давления V-2003»)
И (Активатор «Сброс газа V-2003 на факел»).*

Общее количество построенных правил ситуационной математической модели для сепаратора V-2003 – 21, в том числе с идентификацией предаварийных ситуаций – 9. Общее количество построенных правил ситуационной модели для процесса первичной сепарации нефти – 149, в том числе с идентификацией предаварийных ситуаций – 63.

Результаты исследования и их обсуждение

Моделирование системы было проведено по архивным данным системы управления технологическим процессом первичной сепарации нефти. В состав выборки были включены 207 случаев срабатывания предупредительной сигнализации с возвратом

в режим нормальной эксплуатации системы управления, 54 случая срабатывания предупредительной сигнализации с возвратом в режим нормальной эксплуатации действиями оператора, 13 случаев срабатывания противоаварийной защиты. Результаты моделирования приведены в таблице.

Для первого и третьего уровней ситуации нарушения технологического режима и аварийные ситуации были распознаны в 100% случаев. В 11 аварийных ситуациях из 13 (84%) в интервале 30–65 с перед срабатыванием противоаварийной защиты были распознаны предаварийные ситуации с формированием активаторов возврата в режим нормальной эксплуатации (7 случаев, 63%) и активаторов перевода в режим отказа (4 случая, 37%).

Результаты моделирования по архивным значениям параметров

Уровень правил / количество случаев	Количество срабатываний по данным архива		Количество идентификации ситуаций при моделировании по уровням		
	предупредительной сигнализации	противоаварийной защиты	1	2	3
1/207	207	–	207	–	–
2/54	54	–	54	41	–
3/13	13	13	13	11	13

Видно, что алгоритмы на основе ситуационной математической модели полностью соответствуют работе имеющихся систем предупредительной сигнализации и противоаварийной защиты, что не снижает проектный уровень технической безопасности объекта. В значительном числе случаев ситуационная математическая модель позволяет прогнозировать развитие аварийной ситуации и предотвращать ее возникновение до срабатывания противоаварийной защиты.

Заключение

Предложена методика построения ситуационной математической модели опасных производственных объектов с возможностью идентификации предаварийных ситуаций технологического процесса на основе слабоформализованных знаний экспертов. Использование систем предотвращения аварийных ситуаций на основе ситуационной математической модели с возможностью прогнозирования аварийных режимов до их фактического возникновения позволит предотвращать аварийную остановку техно-

логического оборудования, что повысит безопасность и устойчивость функционирования опасных производственных объектов.

Список литературы

1. Горюхин В.В. Система анализа предаварийных режимов и контроля оператора в сложных технологических процессах // Актуальные проблемы современной науки: труды 3-го международного форума (Самара, 10–12 сентября 2019 г.). Самара: Самарский государственный технический университет, 2019. С. 36–40.
2. Проталинский О.М., Немчинов Д.В. Система поддержки принятия управленческих решений по снижению рисков аварийных ситуаций на промышленных объектах // Автоматизация в промышленности. 2010. № 3. С. 13–16.
3. Немчинов Д.В., Селиверстова А.Н., Антонов О.В. Поддержка принятия решений по управлению предаварийными ситуациями на примере установки каталитического риформинга // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Управление, вычислительная техника и информатика. 2020. № 2. С. 19–25.
4. Федеральный закон от 21 июля 1997 г. № 116-ФЗ «О промышленной безопасности опасных производственных объектов» (с изменениями на 8 декабря 2020 г.) [Электронный ресурс]. URL: <http://docs.cntd.ru/document/9046058> (дата обращения: 18.01.2022).
5. Галеев А.Д., Поникаров С.И. Анализ риска аварий на опасных производственных объектах. Казань: Изд-во КНИТУ, 2017. 152 с.