

<https://doi.org/10.21122/2227-1031-2020-19-5-437-448>

УДК 681.5.09

Интеллектуальная модель потенциальных рисков возникновения техногенной катастрофы

Кандидаты техн. наук, доценты А. В. Гулай¹⁾, В. М. Зайцев¹⁾

¹⁾Белорусский национальный технический университет (Минск, Республика Беларусь)

© Белорусский национальный технический университет, 2020
Belarusian National Technical University, 2020

Реферат. Техногенная катастрофа рассматривается как информационное отображение катастрофического развития событий в системе управления объектом, своеобразная проекция техногенной катастрофы на информационную плоскость. В статье представлена интеллектуальная модель, рассмотрены динамика и диапазоны аварийного изменения параметров системы управления, выполнена оценка потенциальных рисков и угроз возникновения катастрофы. Показано, что на макроструктурном уровне для семантического описания катастрофы достаточно эффективно применение древовидной сети сценариев, которая отображает концептуальную схему предметной и проблемной областей катастрофы и основывается на суждениях экспертов, их опыте и интуиции. Это позволяет вероятностными методами оценить потенциальные риски катастрофы с помощью двух количественных показателей: уровня риска (вероятности) возникновения явления в некоторой контрольной точке времени и величины ожидаемого материального ущерба. Для оценки возможных микросостояний по каждому из критических параметров объекта предложено применять аппарат нечеткой логики, экспертным путем задавать границы допусков и функции принадлежности к областям безаварийного функционирования объекта, отслеживать траектории миграции относительных значений параметров, своевременно обеспечивать условия их принудительного возвращения в рабочую область штатного функционирования. В интеллектуальную модель потенциальных рисков развития аварийной ситуации введены количественные показатели, имеющие нечеткую природу, для оценки динамики угрозы возникновения катастрофы. Одним из таких показателей является экспертный уровень угрозы наступления катастрофы при миграции группы аварийно опасных параметров технического объекта. Рассмотрен также интервал времени, отсчитываемый от текущего момента до ожидаемого момента наступления катастрофы при заданном предельно допустимом уровне угрозы ее возникновения.

Ключевые слова: техногенная катастрофа, интеллектуальная модель, система управления, древовидный сценарий, информационный образ, миграция параметров, потенциальный риск, ожидаемый ущерб

Для цитирования: Гулай, А. В. Интеллектуальная модель потенциальных рисков возникновения техногенной катастрофы / А. В. Гулай, В. М. Зайцев // *Наука и техника*. 2020. Т. 19, № 5. С. 437–448. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2020-19-5-437-448>

Intelligent Model of Potential Risks in Emergence of Man-Made Disaster

A. V. Gulay¹⁾, V. M. Zaitsev¹⁾

¹⁾Belarusian National Technical University (Minsk, Republic of Belarus)

Abstract. A man-made catastrophe is considered as an information display of catastrophic development of events in the management system, a peculiar projection of a man-made catastrophe on the information plane. The paper presents an intellectual model, considers dynamics and ranges of emergency changes in management system parameters, assesses potential risks and threats of catastrophe emergence. It has been shown that at the macro-structural level for semantic description

Адрес для переписки

Гулай Анатолий Владимирович
Белорусский национальный технический университет
просп. Независимости, 65,
220013, г. Минск, Республика Беларусь
Тел.: +375 17 293-93-25
is@bntu.by

Address for correspondence

Gulay Anatoliy V.
Belarusian National Technical University
65, Nezavisimosty Ave.,
220013, Minsk, Republic of Belarus
Tel.: +375 17 293-93-25
is@bntu.by

of a catastrophe, it is quite effective to use a tree-like network of scenarios, which displays the conceptual scheme of the subject and problem areas of the catastrophe and is based on judgments of experts, their experience and intuition. This allows probabilistic methods to assess potential risks of a catastrophe using two quantitative indicators: risk (probability) level of phenomenon occurrence at a certain control point of time and the volume of the expected material loss. It has been suggested that for assessment of possible microstate the fuzzy logic should be applied for each critical object parameter, tolerance limits and functions of affiliation with the fields of fail-safe object functioning should be set by expertise, migration trajectories of relative parameter values should be monitored and terms of their forced return to the working field of regular functioning should be duly provided. Quantitative indicators having imprecise origin have been introduced in the intelligent model of potential risks to assess dynamics of catastrophe threat. One of these indicators is the expert level of catastrophe occurrence during migration of a group of abnormally dangerous parameters of a technical object. The time interval has also been considered which is measured from the current moment to the expected moment of catastrophe occurrence at the preset maximum permissible level of catastrophe threat.

Keywords: man-made catastrophe, intelligent model, management system, tree-structured scenario, information context, migration of parameters, potential risk, expected damage

For citation: Gulay A. V., Zaitsev V. M. (2020) Intelligent Model of Potential Risks in Emergence of Man-Made Disaster. *Science and Technique*. 19 (5). 437–448. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2020-19-5-437-448> (in Russian)

Введение

Для современного состояния промышленно развитых стран мира характерно нарастание угроз в технологической сфере, при этом техногенные катастрофы фактически становятся постоянно действующими факторами экономики. Крупнейшие аварии и катастрофы уносят множество человеческих жизней, причиняют огромный и часто невосполнимый ущерб окружающей среде, приводят к значительным экономическим потерям и требуют больших затрат на ликвидацию их последствий. В связи с ухудшением техногенной обстановки можно ожидать, что во многих случаях отдельные, даже небольшие по своим масштабам, производственные аварии станут одной цепью, будут провоцировать и усиливать друг друга, а также вызывать системные эффекты, не поддающиеся локализации и имеющие огромные прямые и косвенные последствия, проявляющиеся на макроэкономическом уровне.

Существенное усложнение промышленных технологий, насыщение предприятий энергоёмким технологическим оборудованием характеризуются появлением новых источников аварий и повышением уровня уязвимости объектов, сопровождаются возрастанием рисков из-за возможных ошибок технического персонала и, следовательно, приводят к значительному повышению вероятности катастроф. В этих условиях возрастает необходимость в развитии методов наиболее раннего обнаружения угроз

возникновения техногенных аварий и катастроф [1–3]. Решение широкого круга вопросов, связанных со снижением вероятности негативных событий в промышленном производстве, может быть найдено при использовании современных информационных технологий для анализа динамики изменения параметров технических объектов.

Интеллектуальная модель техногенной катастрофы: концептуальный подход

В статье техногенная катастрофа рассматривается как информационное отображение катастрофического развития событий в системе управления, своеобразная проекция техногенной катастрофы на информационную плоскость. С целью автоматизации обработки данных о масштабах процессов, происходящих в системе, производится перенос проблемы анализа катастрофы в поле ее информационного проявления. При этом характеристики реальной техногенной катастрофы интерпретируются как катастрофическое изменение информативных функциональных параметров системы управления. Основные задачи анализа реального катастрофического события – построение интеллектуальной модели и рассмотрение динамики и диапазонов аварийного изменения параметров системы управления, оценка потенциальных рисков и угроз возникновения катастрофы.

Под техногенной аварией здесь понимается процесс несанкционированного высвобождения на производственном объекте сконцентрированных опасностей той или иной природы, которые в конечном итоге оказывают негативное, а в предельном случае – разрушительное и поражающее воздействие на производственное оборудование, помещения, окружающую среду и людей. Техногенная катастрофа – крупномасштабная авария объекта технического назначения, имеющая, как правило, обширный пространственный размах и характеризующаяся резким скоротечным изменением состояния объекта при определенных количественных вариациях возмущающих и управленческих параметров, от которых это состояние зависит. Техногенная катастрофа сопровождается крайне тяжелыми последствиями в виде материального ущерба и человеческих жертв.

Анализ многочисленных техногенных катастроф позволяет выделить следующие основные и наиболее частые причины их возникновения: отказы производственно-технологического оборудования, несоблюдение технологических регламентов, ошибки производственного персонала, потеря управления аварийно опасной частью оборудования. Строгое рассмотрение вопроса требует учета естественных природных причин: разрушительных землетрясений, цунами, наводнений, вероятность возникновения которых зависит от географического местоположения объектов.

Возникновению катастроф, как правило, подвержены объекты, потенциально имеющие [2, 3]:

- несколько различных устойчивых состояний работоспособности или жизнедеятельности;
- те или иные переходные неустойчивые состояния (точки бифуркации), выход из которых возможен при воздействии даже малых возмущающих или управленческих импульсов;
- явные или латентные механизмы постепенного изменения параметров или характеристик протекающих процессов, которые могут сопровождаться накоплением микродефектов и в дальнейшем приводить к быстрому (лавинообразному), а в ряде случаев необратимому изменению своих состояний;

- возможность реализации переходов между некоторыми состояниями по гистерезисным траекториям.

Объекты, подверженные катастрофам, имеют схожие функционально-морфологические особенности, а развивающиеся на них аварии различаются масштабами проявлений и тяжестью последствий, но имеют один и тот же характер побудительных причин. С учетом этого изучаемые авторами статьи нарушения штатных циклов управления вполне могут рассматриваться в качестве предвестников реальных аварий. В данном случае предполагается, что в процессе развития катастрофы сохраняется связь контролируемых параметров с реальными свойствами объекта, и формирующийся информационный образ адекватно отражает резко изменяющееся состояние объекта контроля.

Выводы и заключения относительно потенциальных рисков техногенных катастроф и динамики угроз их возникновения не могут быть отнесены ни к категории четких, ни к категории вероятностных. При этом процессы в изучаемом объекте целесообразно рассматривать на двух уровнях: макро- и микроструктурном. По природе происхождения исходной информации, применяемой при построении моделей событий и проведении требуемых оценок на каждом из уровней, одна часть информационного материала представляет собой экспертные сведения и эвристические правила, а другая часть – четкие и статистически подтвержденные данные [4]. В свою очередь, теоретические подходы к формированию выводов и оценок предпочтительнее основывать на эвристико-алгоритмических методах, доступных для использования в инженерной практике. Можно говорить только о некоторой степени уверенности в правомочности выводов и оценок в зависимости от доверия к знаниям экспертов и от ситуаций, складывающихся на рассматриваемых интервалах времени.

Для семантического описания катастрофы на макроструктурном уровне эффективно применение так называемой древовидной сети сценариев. Она, по сути, отображает концептуальную схему анализируемых предметных и проблемных областей, которая основывается на

суждениях экспертов, их опыте и интуиции [5]. Под сценарием будем понимать правдоподобную последовательность возможных случайных событий и неслучайных действий производственно-технического персонала, сопутствующих возникновению и развитию катастрофы. Корневым вершинам древовидной сети сценариев соответствуют возможные причины катастрофы, а ветвям – ожидаемые сценарии развития событий, отражающие в хронологическом порядке вовлекаемые в катастрофу составные части и процессы рассматриваемого объекта и его окружения, складывающиеся ситуации, защитные мероприятия персонала, результаты действий и наступившие последствия.

Возникновение катастрофы – это совокупность случайных многофакторных процессов, которые на макроструктурном уровне математически могут быть формализованы с помощью аппарата потоков событий [6, 7]. В соответствии с основными причинами возникновения катастрофы в каждом сценарии i -й ветви древовидной сети сценариев следует выделять следующие потоки событий:

- технических отказов аварийно опасного производственно-технологического оборудования, суммарная интенсивность которых составляет λ_i ;
- ожидаемых нарушений технологических регламентов с их суммарной интенсивностью ρ_i ;
- ожидаемых ошибок производственного персонала с суммарной интенсивностью π_i ;
- потерь управления аварийно опасной частью оборудования с суммарной интенсивностью ξ_i ;
- разрушительных стихийных бедствий и природных явлений с суммарной интенсивностью β_i .

Выделяется также обобщенный поток катастрофы с его консолидированной интенсивностью $\mu_i = \lambda_i + \rho_i + \pi_i + \xi_i + \beta_i$. Если в древовидной сети сценариев производственного объекта выделено N сценариев-ветвей, то верхняя граница интенсивности объединенного потока катастроф $\sup\{\mu\}$ будет определяться суммой интенсивностей консолидированных потоков его ветвей

$$\sup\{\mu\} = \sum_{i=1}^N \mu_i = \sum_{i=1}^N (\lambda_i + \rho_i + \pi_i + \xi_i + \beta_i).$$

При этом сам объединенный поток, являясь результатом взаимного наложения совокупностей различных потоков, в соответствии с предельными теоремами математической теории случайных потоков может рассматриваться как наиболее энтропийный пуассоновский поток [6, 7].

Эти положения позволяют применить экспоненциальную модель событий для любого момента времени t и оценить вероятность возникновения катастрофы $P_K(t)$ по следующей формуле [6]:

$$P_K(t) = 1 - e^{-t \sup\{\mu\}}.$$

Данная модель характеризует постоянное нарастание вероятности катастрофы с течением времени, и при неограниченном увеличении t имеет место предельное соотношение $P_K(t) \rightarrow 1$. На практике выбирается рациональная оценка длительности плано-предупредительного периода T_n проведения функционального контроля оборудования и мероприятий по своевременной замене узлов, агрегатов, электронных компонентов и ликвидации последствий ошибок персонала. Кроме того, административно-организационными методами достигается постоянное повышение профессионализма и квалификации персонала. Эти меры обеспечивают поддержание вероятности возникновения катастрофы на требуемом допустимом уровне $P_K^*(t)$.

Риски катастроф принято оценивать с помощью двух количественных показателей, которые имеют статистическую природу: уровня риска в виде вероятности возникновения катастрофы $P_K(t)$ в некоторой контрольной точке времени $t = T_K$ и величины ожидаемого ущерба U . С целью сопоставления катастроф различного происхождения может быть применена достаточно распространенная эмпирическая шкала уровней относительных рисков, соответствующая требуемым или желаемым значениям вероятностей $P_K(t)$ в точке временной оси $t = T_K$: 0–0,1 – минимальный; 0,1–0,3 – ма-

лый; 0,3–0,4 (0,5) – средний; 0,4 (0,5)–0,7 – высокий; 0,70–0,85 – критичный; 0,85–1,00 – катастрофический уровни относительного риска.

Для правильной оценки рисков необходимо учитывать общую наработку оборудования T_n на начало очередного планово-предупредительного периода и длительность этого периода T_n , т. е. $T_k = T_n + T_n$. Это позволяет по желаемому уровню риска $P_K^*(t = T_k)$ оценить верхнюю допустимую границу длительности планово-предупредительного периода $\sup\{T_n\}$:

$$1 - e^{-(T_n + \sup\{T_n\})\sup\{\mu\}} \leq P_K^*(t = T_k),$$

откуда $\sup\{T_n\} \leq -[\sup\{\mu\}]^{-1} \ln[1 - P_K^*(t = T_k)] - T_n$.

Таким образом, при прочих равных условиях уменьшение относительного риска катастрофы объективно может быть достигнуто за счет уменьшения верхней границы интенсивности объединенного потока $\sup\{\mu\}$, а также за счет сокращения длительности планово-предупредительного периода $\sup\{T_n\}$.

Представляет интерес рассмотрение особенностей изменения анализируемых параметров на конкретном примере. При интенсивности потока катастроф на уровне $\sup\{\mu\} = 6,9442 \cdot 10^{-6}$ 1/ч при $T_n = 43800$ ч (около пяти лет круглосуточного функционирования) и длительности планово-предупредительного периода $\sup\{T_n\} = 8928$ ч (годовой ресурс рабочего времени при круглосуточном функционировании) относительный риск $P_K^*(t = T_k = 52728)$ оценивается на уровне 0,3066. Уменьшение интенсивности потока катастроф $\sup\{\mu\}$ до уровня $3,4721 \cdot 10^{-6}$ 1/ч при тех же T_n и $\sup\{T_n\}$ позволяет снизить относительный риск катастрофы P_K^* до уровня 0,1673. С целью обеспечения $P_K^*(t = T_k)$ на уровне 0,5 необходимо, чтобы длительность планово-предупредительного периода составляла $\sup\{T_n\} \leq 155820$ ч. Для обеспечения снижения $P_K^*(t = T_k)$ до уровня 0,3 нужно, чтобы $\sup\{T_n\}$ было менее 58949 ч.

Средняя величина ожидаемого ущерба U может быть определена значением математического ожидания

$$U = \sum_{i=1}^N P_i U_{i3},$$

где $P_i = \mu_i / \sup\{\mu\}$; $\sum_{i=1}^N P_i = 1$; P_i – условная ве-

роятность развития катастрофы по i -му сценарию; U_{i3} – экспертная оценка ожидаемого уровня ущерба при развитии i -го сценария.

Отдельные j -е состояния макроструктурного уровня аварийно опасного объекта образуют множества $\{X_j(t)\}$, $j = 1, 2, \dots, n$. В циклах мониторинга состояние объекта естественно оценивать совокупностями текущих значений контролируемых параметров (характеристик) внутренних микросостояний

$$X_j(t) = [\alpha_{j1}(t), \alpha_{j2}(t), \dots, \alpha_{jR}(t), \dots, \alpha_{ja}(t), \alpha_{jb}(t), \dots].$$

Некоторое количество R из них относится к категории критических и оказывает существенное влияние на возникновение аварий и катастроф.

При построении интеллектуальной модели исключительное значение имеют мнения и интуитивные оценки экспертов – высококвалифицированных профильных аналитиков в области создания и эксплуатации оборудования и систем различного функционального назначения. Состав критических параметров должен определяться по результатам шкалирования мнений экспертов и последующего обобщения их оценок. Значения отдельных параметров характеризуют возможные микросостояния объекта, которые соответствуют тем или иным аспектам протекания внешних и внутренних процессов и формируются измерительными трактами на основании сигналов сенсоров. Точность представления контролируемых параметров зависит от чувствительности сенсоров, характеристик трактов измерения, достоверности передачи информации по системным каналам, технической надежности аппаратуры, алгоритмов оцифровки и обработки данных [8]. На стадии системного анализа целесообразно полагать координаты вектора взаимно независимыми, что соответствует наиболее сложным условиям оценки энтропии возможных состояний объекта.

Для оценки возможных микросостояний по каждому из параметров или каждой характеристике объекта задаются пределы (границы) допусков безаварийного функционирования

$$\alpha_{jr}(t) \in (\alpha_{jrн}, \alpha_{jrв}),$$

где $\alpha_{jrн}$, $\alpha_{jrв}$ – требуемые нижний и верхний пределы допуска параметра или характеристики $\alpha_{jr}(t)$ для $r = 1, 2, \dots, R$ [9].

Выполнение этой задачи достигается расчетным или экспертным путем.

Внедрение интеллектуальных методов цифрового управления позволяет оперативно выявлять зарождение аварийно опасных тенденций в возможных миграциях значений критических параметров и характеристик к индивидуальным границам допусковых диапазонов [10]. Для выполнения контрольных операций целесообразно выделить следующие области возможного расположения значений каждого параметра или характеристики:

- рабочую область (РО) штатного функционирования объекта при размещении значения контролируемого параметра или характеристики между верхней и нижней границами данной области;
- верхнюю (ВП) и нижнюю (НП) предупредительные области выработки штатных управленческих воздействий при достижении контролируемым параметром границы рабочей области штатного функционирования объекта (соответственно верхней и нижней);
- верхнюю (ВА) и нижнюю (НА) аварийные области выработки экстренных управленческих воздействий при достижении контролируемым параметром соответственно верхней границы верхней предупредительной области или нижней границы нижней предупредительной области.

Взаимное расположение областей, границ между ними и траектория миграции относительного значения некоторого параметра или характеристики $\alpha_{jr}^*(t)$ показаны на рис. 1. При указанной схеме расположения допусковых диапазонов рабочая область – это единственный диапазон, который может рассматриваться как область гарантированного безаварий-

ного функционирования или жизнедеятельности объекта. Объединение рабочей и предупредительных областей соответствует диапазону условного безаварийного функционирования с абсолютной шириной $2W_{jr} = \alpha_{jrв} - \alpha_{jrн}$, при этом используется относительная шкала значений параметра с размахом ± 1 :

$$\alpha_{jr}^*(t) = \left\{ \alpha_{jr}(t) - \left(\alpha_{jrн} / 2 + \alpha_{jrв} / 2 \right) \right\} / W_{jr}.$$

Предупредительные области следует рассматривать как диапазоны преимущественной реализации управленческих процессов. Границы областей в общем случае должны устанавливаться конкретно для каждого параметра или характеристики. Чаще всего ширина предупредительных областей ВП и НП одинакова и составляет 20–30 % от размаха относительной шкалы.

Траектория миграции относительного значения параметра или характеристики $\alpha_{jr}^*(t)$ в процессе своего развития может достигать предельных значений предупредительной области и пересекать ее границы. Если не будут предприняты эффективные управленческие действия в потенциально опасных точках траектории (рис. 1, точки *B*, *C*) по принудительному возвращению текущего значения параметра или характеристики в рабочую область, то спонтанный или спровоцированный переход в аварийную область будет сопровождаться реальной угрозой возникновения катастрофы. Точки *F* и *G* на рис. 1 соответствуют моментам времени начала управленческих действий по предотвращению негативного развития траектории.

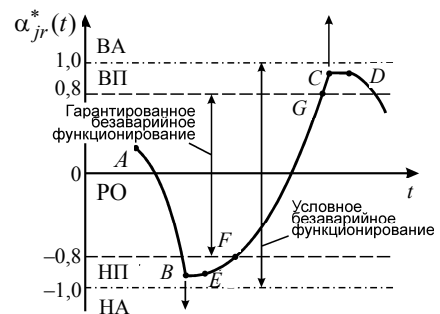


Рис. 1. Расположение областей относительного значения параметра $\alpha_{jr}^*(t)$

Fig. 1. Location of areas for parameter relative value $\alpha_{jr}^*(t)$

Интеллектуальная оценка рисков возникновения техногенной катастрофы

Исходной информацией для выявления тенденций, приводящих к катастрофам, являются временные ряды в виде последовательностей наблюдений в дискретные моменты времени аварийно опасных координат случайных векторов $X_j(t)$ для $t = t_0 + h\Delta t$, $h = 0, 1, 2, \dots$; $\Delta t \leq (2f_{\max})^{-1}$ [11, 12]. Здесь f_{\max} – частота дискретизации параметров, значение которой в соответствии с теоремой Котельникова – Найквиста принимается в качестве граничного для спектральных разложений координат векторов $X_j(t)$. В большинстве случаев для каждого параметра или характеристики $\alpha_{jr}(t)$ уровень h временного ряда можно представить как некоторую аддитивную комбинацию трендового, циклического и случайного компонентов.

В объектах, которым свойственны быстропротекающие процессы (например, в техносистемах), практическое значение при выработке управленческих решений имеют краткосрочные тренды. Для оперативного управления процессами предлагается использовать алгоритм непрерывного динамического отслеживания отдельных временных рядов $\alpha_{jr}(t)$ контролируемых координат векторов $X_j(t)$ на каждом четырехточечном интервале из последовательности интервалов наблюдения за функционированием или жизнедеятельностью объекта, «скользящих» по оси времени. За основу выработки решений целесообразно принять результаты многошагового линейного аналитического сглаживания относительных значений $\alpha_{jr}^*(t)$ в смежных отсчетах для фактически измеренного параметра $\alpha_{jr}(t)$ и последовательного продолжения контролируемой траектории миграции в точках временной оси вплоть до момента ее разрушения [6]:

$$\alpha_{jr}^*(t_h); \alpha_{jr}^*(t_{h+1}); \alpha_{jr}^*(t_{h+2}); \alpha_{jr}^*(t_{h+3});$$

$$\alpha_{jr}^*(t_{h+1}); \alpha_{jr}^*(t_{h+2}); \alpha_{jr}^*(t_{h+3}); \alpha_{jr}^*(t_{h+4});$$

$$\alpha_{jr}^*(t_{h+2}); \alpha_{jr}^*(t_{h+3}); \alpha_{jr}^*(t_{h+4}); \alpha_{jr}^*(t_{h+5}).$$

При этом относительные значения всех отсчетов не должны выходить за границы предупредительных областей, соответствующих значениям $+1$ и -1 , и объект должен оставаться в диапазоне условного безаварийного функционирования.

Четыре смежных отсчета для «завязки» и последующего продолжения траектории выбраны потому, что они соответствуют минимальному количеству отсчетов, которые позволяют достаточно обоснованно отстроиться от флуктуационных колебаний и выявить факты возникновения, развития и разрушения тенденций целенаправленной миграции значений параметра $\alpha_{jr}(t)$. В случае линейного аналитического сглаживания на интервале времени t_h , $t_{h+3} = t_h + 3\Delta t$ сглаживающая зависимость будет иметь следующий вид [6]:

$$A_{jr}^*(t_h, t) = [K_{\text{тар}}^* / D_t]t + M_{\text{ар}}^* - [K_{\text{тар}}^* / D_t]M_t.$$

Это аппроксимирующий линейный сплайн участка траектории миграции, оптимальные коэффициенты которого выводятся на основе метода наименьших квадратов. Расчеты среднего значения M_t^* и дисперсии D_t^* времени t , среднего значения координаты $M_{\text{ар}}^*$ и коэффициента корреляции $K_{\text{тар}}^*$ для четырех смежных отсчетов могут выполняться по соотношениям, достаточно простым в части состава арифметических операций и коротким по времени реализации на современных сигнальных процессорах:

$$M_t^* = t_h + 1,5\Delta t;$$

$$D_t^* = 1,25\Delta t^2;$$

$$M_{\text{ар}}^* = \{ \alpha_{jr}^*(t_h) + \alpha_{jr}^*(t_h + \Delta t) + \alpha_{jr}^*(t_h + 2\Delta t) + \alpha_{jr}^*(t_h + 3\Delta t) \} / 4;$$

$$K_{\text{тар}}^* = \Delta t [-0,375\alpha_{jr}^*(t_h) - 0,125\alpha_{jr}^*(t_h + \Delta t) + 0,125\alpha_{jr}^*(t_h + 2\Delta t) + 0,375\alpha_{jr}^*(t_h + 3\Delta t)].$$

Если локальная тенденция действительно имеет место и отражается зависимостью $A_{jr}^*(t_h, t)$, то при нормальном распределении ошибок измерений с консолидированными среднеквадратическими отклонениями σ_{jr}^* каждое из значений $\alpha_{jr}(t_h)$, $\alpha_{jr}(t_{h+1})$, $\alpha_{jr}(t_{h+2})$, $\alpha_{jr}(t_{h+3})$ с вероятностью не ниже $p = 0,997$ должно находиться внутри зоны тренда

$$Z_{jr}^*(t) = A_{jr}^*(t_h, t) \pm 3\sigma_{jr}^*$$

что отражается следующей продукцией:

$$\text{IF } A_{jr}^*(t_h, t) - 3\sigma_{jr}^* \leq \alpha_{jr}^*(t) \leq A_{jr}^*(t_h, t) + 3\sigma_{jr}^*$$

$$\text{AND } t \in (t_h, t_h + 3\Delta t) \text{ THEN } \alpha_{jr}^*(t) \in Z_{jr}^*(t).$$

Этот признак целесообразно использовать в качестве критерия «завязки», продолжения или разрушения траектории миграции. Локальная тенденция нарастания по времени координаты $\alpha_{jr}^*(t)$ выявляется при $K_{\text{тар}}^* > 0$; напротив, в случае $K_{\text{тар}}^* < 0$ наблюдается тенденция убывания данной координаты. Доверительная вероятность указанных событий оценивается значением $P_{\text{дов}} = p^4 = 0,988$; четвертая степень вероятности p в данном случае определяется тем, что в обработке используется четыре отсчета.

В том случае, если локальная изменчивость по времени координаты $\alpha_{jr}^*(t)$ проявляется достаточно слабо, то модуль коэффициента корреляции $K_{\text{тар}}^*$ оказывается крайне малым или вообще $K_{\text{тар}}^* \rightarrow 0$. Подобные ситуации принято называть флэтом (боковым трендом). На рис. 1 участкам флэта могут быть поставлены в соответствие сегменты BE и CD траектории. При техническом анализе на основе экспертных оценок необходимо задать некоторое пороговое значение $K_{\text{ф}}^*$, ниже которого (т. е. для $|K_{\text{тар}}^*| < K_{\text{ф}}^*$) принимается решение о наличии флэта. Флэт в большинстве случаев – предвестник изменения тенденции развития траектории. Выявление локального флэта или

отсутствия выраженной локальной тенденции не исключает наличие тренда на более продолжительном интервале времени, что требует организации дополнительного контроля.

На следующем шаге рассматриваются отсчеты $\alpha_{jr}^*(t_{h+1} = t_h + \Delta t)$; $\alpha_{jr}^*(t_{h+2} = t_h + 2\Delta t)$; $\alpha_{jr}^*(t_{h+3} = t_h + 3\Delta t)$; $\alpha_{jr}^*(t_{h+4} = t_h + 4\Delta t)$. По их значениям на интервале времени $t_{h+1} = t_h + \Delta t$; $t_{h+4} = t_h + 4\Delta t$ строится зависимость $A_{jr}^*(t)$ и делается вывод о проявлении локальной тенденции на отрезке, сдвинутом по времени вперед на один квант Δt относительно предыдущего i -го шага. Аналогичным образом проводятся операции с отсчетами $\alpha_{jr}^*(t_{h+2} = t_h + 2\Delta t)$; $\alpha_{jr}^*(t_{h+3} = t_h + 3\Delta t)$; $\alpha_{jr}^*(t_{h+4} = t_h + 4\Delta t)$; $\alpha_{jr}^*(t_{h+5} = t_h + 5\Delta t)$, строится и анализируется зависимость $A_{jr}^*(t)$ и т. д. Многошаговому процессу соответствуют точки 1, 2, 3, ..., 9 на рис. 2. Эти действия напоминают технологию формирования скользящего среднего [11, 12].

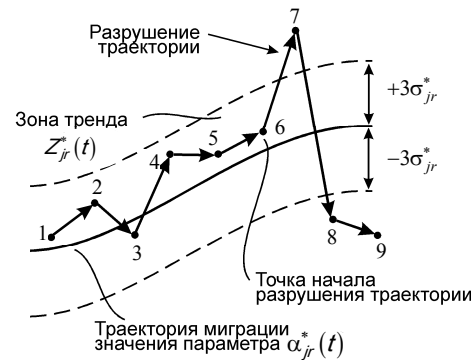


Рис. 2. Развитие и разрушение траектории миграции значения параметра $\alpha_{jr}^*(t)$

Fig. 2. Development and destruction of migration path for parameter $\alpha_{jr}^*(t)$

Правомерно допустить, что выраженная локальная тенденция или флэт считаются выявленными только в том случае, если из четырех смежных отсчетов имеет место выход из допустимой зоны не более одного значения. В случае, если локальная тенденция или флэт вообще отсутствуют, по крайней мере, два, три или

даже четыре результата наблюдений координаты $\alpha_{jr}^*(t)$ будут находиться вне рассматриваемой зоны тренда $Z_{jr}^*(t)$. Миграция координаты при этом обусловлена, скорее всего, хаотическими случайными колебаниями, а траектория «завязана» или продолжена быть не может. Последнее обстоятельство указывает на возможное разрушение траектории (рис. 2, точки 7–9).

При выходе значения параметра или характеристики за границы рабочей области критичным является время его пребывания в предупредительной области. С увеличением этого времени возрастает вероятность перехода в верхнюю аварийную область при тенденции нарастания координаты $\alpha_{jr}^*(t)$ или в нижнюю аварийную область при тенденции убывания данной координаты. Оценить уровень угрозы такого перехода можно только методом построения шкалы экспертных оценок, соответствующих конкретным физическим особенностям развития процесса. С помощью этой шкалы достигается решение следующих задач:

- определяется допустимая длительность выработки и реализации управленческих действий по возврату значения параметра или характеристики в рабочую область;

- обеспечиваются передача информации о складывающейся ситуации производственно-техническому персоналу и выработка адекватных сигналов для реализации управления и оповещения.

Динамику угрозы возникновения катастрофы предлагается оценивать с помощью следующих количественных показателей, которые имеют нечеткую природу: уровень угрозы возникновения катастрофы $\text{Alarm}[t, R = m]$ при миграции аварийно опасных параметров; интервал времени ΔT_K , отсчитываемый от текущего момента астрономического времени t до ожидаемого момента наступления аварии $t_{\text{ав}}$ при заданном предельно допустимом уровне A_{jr}^* угрозы возникновения катастрофы.

Рассмотрим нечеткую переменную «экспертный уровень угрозы возникновения ката-

строфы $\text{Alarm}[t, R = 1]$ при миграции одного аварийно опасного параметра (характеристики) $\alpha_{jr}^*(t)$ ». Экспертный уровень угрозы имеет область значений $[0; +1]$. Конкретное значение этой нечеткой переменной определяются следующими возможными событиями: непрерывным нахождением (при изменении во времени) значения параметра в предупредительной области при его движении по траектории без выхода в аварийную область и без возврата в рабочий диапазон: в случае верхней предупредительной и аварийной областей – для $K_{\text{авр}}^* > 0$; в случае нижнего предупредительного и аварийного диапазонов – для $K_{\text{авр}}^* < 0$.

Предположим, что траектория миграции значения параметра или характеристики $\alpha_{jr}^*(t)$ «завязана» в момент времени $t = T_0$. Рассмотрим время $T_{\text{ВП}}$ и $T_{\text{НП}}$ непрерывного пребывания значения параметра или характеристики $\alpha_{jr}^*(t)$ в предупредительных областях (верхней и нижней соответственно). Их значения будут являться элементами двух нечетких множеств, в общем случае имеющих различные функции принадлежности $Q_{\text{ВП}jr}(T_{\text{ВП}})$ и $Q_{\text{НП}jr}(T_{\text{НП}})$ [13, 14]. На интервале $(0; +\infty)$ области определения времени $T_{\text{ВП}}$ и $T_{\text{НП}}$ данные функции будут убывающими, при этом:

$$Q_{\text{ВП}jr}(0) = Q_{\text{НП}jr}(0) = +1;$$

$$Q_{\text{ВП}jr}(t \rightarrow +\infty) = Q_{\text{НП}jr}(t \rightarrow +\infty) = 0.$$

В частном случае эти функции могут совпадать. Функции принадлежности могут быть определены экспертами в решетчатом виде и заданы таблицами значений для дискретных аргументов. Технология отслеживания траектории миграции позволяет определять моменты выхода значений параметра или характеристики из рабочей области и перемещения в проблемную область. Для любого момента астрономического времени $t = T_0 + T_{\text{ВП}}$ или $t = T_0 + T_{\text{НП}}$ экспертный уровень $\text{Alarm}[t, R = 1]$ угрозы возникновения катастрофы при миграции одного параметра (характеристики) может быть оценен дополнением до +1 результатов

фаззификации времени $T_{ВП}$ или $T_{НП}$ по соответствующим функциям принадлежности

$$\text{Alarm}[T^*, R = 1] = 1 - Q_{jr}^*.$$

Здесь и в дальнейшем символ T^* означает одновременное представление $T_{ВП}$ и $T_{НП}$, а Q^* – одновременное представление $Q_{ВП}(T_{ВП})$ и $Q_{НП}(T_{НП})$.

Если установлен или задан предельно допустимый уровень A_{jr}^* угрозы возникновения катастрофы при движении значения по траектории без промежуточного возврата в рабочую область, то интервал времени ΔT_K , отсчитываемый от текущего момента астрономического времени t до ожидаемого момента наступления аварии $t_{авjr}$, оценивается следующим значением:

$$\Delta T_K = t_{авjr} - t, t_{авjr} = T^* + T_0;$$

$$T^* = \{1 - Q_{jr}^*(T = t_{авjr} - T_0)\}^{-1}$$

$$\text{при Alarmjr}(T^*) = A_{jr}^*,$$

где $\{1 - Q_{jr}^*\}^{-1}$ – функция, обратная к функции $1 - Q_{jr}^*$ для соответствующей предупредительной области, которая применяется при дефаззификации (скаляризации) времени T^* по значению функции $\text{Alarm}[t, R = 1] = A_{jr}^*$.

Потенциально это позволяет прогнозировать моменты возникновения катастроф при условии непрерывного отслеживания траектории миграции значения параметра (характеристики) $\alpha_{jr}^*(t)$.

Рассмотрим нечеткую переменную «экспертный уровень угрозы $\text{Alarm}[t, R = m]$ возникновения катастрофы при миграции группы аварийно опасных параметров (характеристик) из m компонентов $\alpha_{ja}^*(t)$, $\alpha_{jb}^*(t)$, $\alpha_{jc}^*(t)$, ..., $\alpha_{jm}^*(t)$ ». Экспертный уровень угрозы, как и в случае одного параметра (характеристики), имеет область значений $[0; +1]$. Конкретное значение этой нечеткой переменной определят-

ся смысловым составом и сочетанием величин параметров группы.

Рассмотрим время $\{T_{ju}^*\}$ ($u = a, b, c, \dots, m$) непрерывного пребывания значений параметров или характеристик $\{\alpha_{jr}^*(t)\}$ в предупредительных областях, начиная с $\{T_{0ju}^*\}$. В любой момент времени конкретный параметр может располагаться только в одной из предупредительных областей или быть за ее пределами. Значения параметров или характеристик будут являться элементами двух групп нечетких множеств, в общем случае имеющих различные убывающие функции принадлежности:

$$\{Q_{ju}^*(T); Q_{ju}^*(0) = +1; Q_{ju}^*(t \rightarrow +\infty) = 0\}.$$

Предположим, что значения параметров или характеристик некоторым случайным образом разложились по $Z_{ВП jr}^*(t)$ и $Z_{НП jr}^*(t)$:

$$\{\alpha_{ju}^*(t) \in Z_{ВП ju}^*(t)\}, u = b, d, f, \dots, m;$$

$$\{\alpha_{ju}^*(t) \in Z_{НП ju}^*(t)\}, u = a, c, e, g, \dots$$

Рассмотрим момент астрономического времени

$$t = T_{0\max R_1} + T_{R_1} < T_{R_1 \rightarrow R_2},$$

где $T_{0\max} = \max \{T_{0ju}^*\}$ ($u = a, b, c, \dots, m$) – момент образования или последнего изменения состава группы R_1 ; T_{R_1} – интервал времени непрерывного пребывания значений группы параметров или характеристик $\{\alpha_{ju}^*(t)\}$ в предупредительных областях до момента очередного изменения состава группы $T_{R_1 \rightarrow R_2}$.

Экспертный уровень $\text{Alarm}[t, R = m]$ угрозы возникновения катастрофы при миграции значений группы параметров (характеристик) может быть оценен дополнением до +1 результатов предварительной фаззификации времени T_{ju}^* по функциям принадлежности и последующего выполнения операций пересечения нечеткой логики [13, 14]:

$$Q_{\text{ВП}}(T_{R_i}) = \min \{ Q_{\text{ВП}ju}(T_{R_i}) \}, u = b, d, f, \dots, m$$

для $K_{\text{тау}}^* > 0$;

$$Q_{\text{НП}}(T_{R_i}) = \min \{ Q_{\text{НП}ju}(T_{R_i}) \}, u = a, c, e, g, \dots$$

для $K_{\text{тау}}^* < 0$;

$$\text{Alarm}[t, R = m] = 1 - \min \{ Q_{\text{ВП}}(T_{R_i}), Q_{\text{НП}}(T_{R_i}) \}.$$

Этот результат вполне согласуется с интуитивным инженерным представлением о том, что с увеличением числа критических параметров в предупредительных зонах уровень угрозы катастрофы возрастает.

Если экспертным путем определен или задан предельно допустимый уровень A_G^* угрозы возникновения катастрофы при движении группы значений по траектории без промежуточного возврата в рабочую область, то интервал времени ΔT_K , отсчитываемый от текущего момента астрономического времени t до ожидаемого момента наступления аварии $t_{\text{ав}G}$, может оцениваться на основе индивидуальных моментов времени перехода значений параметров (характеристик) в аварийные области

$$\Delta T_K = \min \{ t_{\text{ав}ju} - t \}, u = a, b, c, \dots, m,$$

где $t_{\text{ав}ju} = T_{ju}^* + T_{0ju}$; $T_{ju}^* = \{ 1 - Q_{ju}^* (T = t_{\text{ав}ju} - T_{0ju}) \}^{-1}$ при $\text{Alarm}ju(T^*) = A_R^*$.

ВЫВОДЫ

1. Показано, что на макроструктурном уровне для семантического описания катастрофы достаточно эффективно применение древовидной сети сценариев, которая отображает концептуальную схему предметной и проблемной областей катастрофы и основывается на суждениях экспертов, их опыте и интуиции. Это позволяет вероятностными методами оценить потенциальные риски катастрофы с помощью двух количественных показателей, имеющих статистическую природу: первый – это уровень риска в виде вероятности возник-

новения явления в некоторой контрольной точке времени, второй – величина ожидаемого материального ущерба.

2. Для оценки возможных микросостояний по каждому из критических параметров объекта предложено применять аппарат нечеткой логики, экспертным путем задавать пределы (границы) допусков и функции принадлежности к областям безаварийного функционирования объекта.

3. Предложенная технология оценки катастрофы позволяет динамически отслеживать траектории миграции относительных значений параметров объекта и своевременно обеспечивать условия их принудительного возвращения в рабочую область штатного функционирования. При этом обеспечивается количественная оценка потенциальных рисков и динамики угроз возникновения катастроф в объектах производственного назначения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Постон, Р. Теория катастроф и ее приложения / Р. Постон, И. Стюарт. М.: Мир, 1980. 608 с.
2. Арнольд, В. И. Теория катастроф / В. И. Арнольд. М.: Наука, 1990. 128 с.
3. Том, Р. Структурная устойчивость и морфогенез / Р. Том. М.: Логос, 2002. 288 с.
4. Гулай, А. В. Экспертная логико-вероятностная модель интеллектуальной системы управления / А. В. Гулай, В. М. Зайцев // Наука и техника. 2014. № 1. С. 30–37.
5. Гулай, А. В. Концептуальные схемы предметных областей в технологии построения интеллектуальных систем / А. В. Гулай, В. М. Зайцев // Электроника инфо. 2016. № 10. С. 56–61.
6. Вентцель, Е. С. Теория вероятностей / Е. С. Вентцель. М.: Наука, 1969. 576 с.
7. Риордан, Дж. Вероятностные системы обслуживания / Дж. Риордан; пер. с англ. Е. Г. Коваленко. М.: Связь, 1966. 184 с.
8. Гулай, А. В. Дистанционное отображение сенсорной информации в базе данных интеллектуальной мехатронной системы / А. В. Гулай, В. М. Зайцев // Электроника инфо. 2015. № 2. С. 51–55.
9. Основы технической диагностики / В. В. Карбиский [и др.]. М.: Энергия, 1976. 464 с.
10. Гулай, А. В. Оценка состояний системотехнической ситуации при адаптивном ситуационном управлении / А. В. Гулай, В. М. Зайцев // Теоретическая и прикладная механика: Междунар. науч.-техн. сб. Минск: БНТУ, 2016. Вып. 31. С. 214–220.

11. Питерс, Т. Основы. Тренды / Т. Питерс, М. Барлетта. СПб.: Изд-во Стокгольм. школы экон. в СПб., 2006. 160 с.
12. Мэрфи, Д. Технический анализ фьючерсных рынков / Д. Мэрфи. М.: Альпина Паблишер, 2011. 616 с.
13. Заде, Л. Понятие лингвистической переменной и ее применение к принятию приближенных решений / Л. Заде. М.: Мир, 1976. 165 с.
14. Штовба, С. Д. Проектирование нечетких систем средствами MatLab / С. Д. Штовба. М.: Горячая линия, 2007. 288 с.

Поступила 15.06.2020

Подписана в печать 17.08.2020

Опубликована онлайн 30.09.2020

REFERENCES

1. Poston R., Stewart I. (1978) *Catastrophe Theory and its Applications*. New York, Pitman. 491.
2. Arnold V. I. (1990) *Catastrophe Theory*. Springer, Berlin, Heidelberg. 79. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-96799-3>.
3. Thom R. (1989) *Structural Stability and Morphogenesis*. CRC Press. 404. <https://doi.org/10.1201/9780429493027>.
4. Gulay A. V., Zaytsev V. M. (2014) Expert Logical and Probabilistic Model of Intellectual Control System. *Nauka i Tekhnika = Science & Technique*, (1), 30–37 (in Russian).
5. Gulay A. V., Zaytsev V. M. (2016) Conceptual Schemes of Subject Areas in the Technology of Building Intelligent Systems. *Elektronika-Info* [Electronics-info], (10), 56–61 (in Russian).
6. Venttsel E. S. (1969) *Theory of Probabilities*. Moscow, Nauka Publ. 576 (in Russian).
7. Riordan J. (1962) *Stochastic Service Systems*. NY, Wiley and Sons. 139.
8. Gulay A. V., Zaytsev V. M. (2015) Remote Display of Sensory Information in the Intelligent Mechatronic System Database. *Elektronika-Info* [Electronics-Info], (2), 51–55 (in Russian).
9. Karibskii V. V., Parkhomenko P. P., Sogomonyan E. S., Khalchev V. F. (1976) *Fundamentals of Technical Diagnostics*. Moscow, Energiya Publ. 464 (in Russian).
10. Gulay A. V., Zaytsev V. M. (2016) Evaluation of the System-Technical Situation States at the Adaptive Situational Control. *Teoreticheskaya i Prikladnaya Mekhanika: Mezhdunar. Nauch.-Tekhn. Sb.* [Theoretical and Applied Mechanics: International Scientific and Technical Collection]. Minsk, BNTU, 31, 214–220 (in Russian).
11. Peters T., Barletta M. (2006) *Fundamentals. Trends*. Saint-Petersburg, Publishing House of Stockholm Economics School in Saint-Petersburg. 160 (in Russian).
12. Murphy J. *Technical Analysis of the Financial Markets*. Moscow, Alpina Publisher Publ. 616 (in Russian).
13. Zadeh L. *The Concept of a Linguistic Variable and its Application to Approximate Reasoning*. Moscow, Mir Publ. 165 (in Russian).
14. Shtovba S. D. (2007) *Designing of Fuzzy Systems by Means of MatLab Facilities*. Moscow, Goryachaya Liniya Publ. 288 (in Russian).

Received: 15.06.2020

Accepted: 17.08.2020

Published online: 30.09.2020