

DETERMINING THE AREA OF A TECHNICAL SYSTEM STABILITY IN FUZZY SETS TERMS

M. Yu. Yastrebov, P. V. Komissarov, S. V. Kolesnichenko

Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping,
St. Petersburg, Russian Federation

Ensuring the stability of the technical systems functioning, including those in water transport, is an important area for the application of mathematical methods, including probabilistic and mathematical-statistical methods. The stochastic nature of disturbances affecting complex systems and worsening the level of stability of the latter should be reflected in the implemented human-machine control loops. One of the directions here is the accounting and use of (usually competing) expert assessments, on the one hand, and a reasonable definition of stability indicators, a choice from a variety of possibilities, on the other hand. From a general point of view of management theory, the method of using expert assessments developed in the paper can be considered as an integral part of the risk management problem that is being developed so far, mainly for economic systems and using only financial criteria. The concept of the minimum allowable efficiency of a technical system is introduced in the paper. On its basis, an approach in which the indicator of the stability of a technical system is linked to a system-wide criterion indicator of the quality of its functioning is implemented. The corresponding mathematical model as a problem of mathematical programming is formulated. Approaches to its solution including for the nonconvex multiextremal case are discussed. A feature of the proposed approach to the definition of the integral indicator of the stability of the dynamics of a technical system is the use of expert assessments in determining the probable range of changes in the controlled variables of the optimization model, implemented as a mathematical programming problem, which logically leads to the use of fuzzy set theory. With the non-linearity of the objective functions and restrictions that arise in this case, the gradient method of searching for a conditional optimum is effective.

Keywords: fuzzy sets, optimizing, expert analysis, area of stability, mathematical programming.

For citation:

Yastrebov, Mikhail Yu., Peter V. Komissarov, and Sergey V. Kolesnichenko. "Determining the area of a technical system stability in fuzzy sets terms." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 15.4 (2023): 692–700. DOI: 10.21821/2309-5180-2023-15-4-692-700.

УДК 519.245

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОБЛАСТИ СТАБИЛЬНОСТИ ТЕХНИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ В ТЕРМИНАХ НЕЧЕТКИХ МНОЖЕСТВ

М. Ю. Ястребов, П. В. Комиссаров, С. В. Колесниченко

ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова»,
Санкт-Петербург, Российская Федерация

Объектом исследования в работе является вопрос обеспечения стабильности функционирования технических систем, в том числе на водном транспорте как важная область приложения математических методов, включая теоретико-вероятностные и математико-статистические. Отмечается, что стохастическая природа возмущений, воздействующих на сложные системы и ухудшающих уровень стабильности последних, должна быть отражена в реализуемых человеко-машинных контурах управления. Одним из направлений здесь является учет и использование (как правило, конкурирующих) экспертных оценок, с одной стороны, и обоснованная дефиниция показателей стабильности, выбор из разнообразия возможностей — с другой. С общей точки зрения теории управления развиваемая в работе методика использования экспертных оценок может рассматриваться как составная часть проблемы управления рисками, развиваемой до настоящего времени в основном для экономических систем и при использовании лишь финансовых критериев. В данной работе вводится понятие «минимально допустимая эффективность технической системы». На его основе реализуется подход, в котором показатель стабильности технической системы увязывается с общесистемным критериальным показателем качества ее функционирования.

Соответствующая математическая модель формулируется как задача математического программирования. Рассматриваются подходы к ее решению, в том числе для невыпуклого многоэкстремального случая. Особенностью предлагаемого подхода к дефиниции интегрального показателя стабильности динамики технической системы является использование экспертных оценок при определении вероятного диапазона изменения управляемых переменных оптимизационной модели, реализуемой как задача математического программирования, что логически приводит к использованию теории нечетких множеств. Отмечается, что при нелинейности возникающих в данном случае целевых функций и ограничений эффективным является градиентный метод поиска условного оптимума.

Ключевые слова: нечеткие множества, оптимизация, экспертные оценки, область стабильности, математическое программирование, градиентный метод.

Для цитирования:

Ястребов М. Ю. Определение области стабильности технической системы в терминах нечетких множеств / М. Ю. Ястребов, П. В. Комиссаров, С. В. Колесниченко // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2023. — Т. 15. — № 4. — С. 692–700. DOI: 10.21821/2309-5180-2023-15-4-692-700.

Введение (Introduction)

Транспортные системы как сложные технические устройства подвержены многочисленным рискам, снижающим стабильность их функционирования. Последние, в свою очередь, обусловлены различными погодными-климатическими факторами, оказывающими влияние на движение судов по морским и внутренним водным путям, а также отказами в работе судового оборудования, береговых механизмов и гидротехнических сооружений. Для части рисков (при наличии однородного статистического материала) оценка вероятности их проявления может быть выполнена с использованием частотного метода.

Во многих случаях соответствующие выборки количественных значений факторов оказываются либо короткими, либо неоднородными, т. е. относящимися к разным регионам и разным типам судовых двигателей. В данном случае может быть использован альтернативный подход с применением экспертных оценок вероятностей проявления факторов риска. При этом возникает проблема согласования конкурирующих оценок, исходящих от различных привлеченных экспертов, и получения обобщающей интегральной оценки факторов с недостаточной стохастичностью (отсутствием установленного факта устойчивости относительных частот), не получившая к настоящему времени исчерпывающего решения. Другим аспектом общей задачи учета и анализа рисков снижения качества функционирования системы является формальная дефиниция показателя стабильности и его использование в рамках математических моделей оптимизационного характера.

Управление рисками для поддержания стабильности системы предполагает, в соответствии с положениями ISO, в том числе и количественную, т. е. *вероятностную*, оценку выявленных рисков¹. В статье [1] предложена концептуальная трактовка термина «риск» применительно к специфике речного транспорта как вероятность неблагоприятных последствий принятого управленческого решения (представляется, что это определение можно распространить также на последствия проявления факторов риска, которые не зависят от управленческих решений, т. е. от влияния «среды», внешней по отношению к рассматриваемой транспортной системе). Существенным является и то, что там же для формализации оценки проявления риска предлагается использование «знаний и опыта людей», т. е. экспертных оценок. Таким образом, «риск как вероятность» открывает концептуальное поле для математических аспектов решения задачи риск-менеджмента.

Целью настоящего исследования является разработка возможного подхода к совмещению экспертных, в том числе качественных оценок и формализованных математических моделей.

Методы и материалы (Methods and Materials)

В ряде научных публикаций обсуждается построение математических моделей учета рисков (которые, впрочем, не носят оптимизационного характера). Так, в исследовании [2] предлагаются

¹ ГОСТ Р ИСО/МЭК 31010-2011. Менеджмент риска. Методы оценки риска. М.: Стандартинформ, 2012. 70 с.

в качестве методологической основы построения IT-платформы удаленного мониторинга техногенных систем, в том числе на речном и морском транспорте, а также для портовых грузоподъемных механизмов формирование матрицы оценок технического состояния слабоструктурированного множества лингвистических (по-видимому, экспертных) критериев. В работе [3] приводится вариант классификации рисков по ряду показателей в основном экономической, а не техногенной природы применительно к решению задач бухгалтерского учета. В работе [4] в основу риск-менеджмента заложено построение матрицы оценивания рисков. При этом следует отметить, что использование данного подхода, с одной стороны, с учетом качественного характера оценок в матрице априорно фиксированного размера (например, 4×4), задающей качественную, а не вероятностную градацию рисков, затрудняет построение математических моделей, но с другой стороны, может служить отправной точкой в использовании методологии нечетких множеств (например, [5], [6]). Исследование этого вопроса является темой данной статьи. С этим согласуется указание в работе [7] на результативность совмещения расчетов и экспертного оценивания вероятностей аварий на гидротехнических сооружениях в рамках сценарного подхода. В русле такого подхода в статье [8] также предлагается включение экспертных оценок в двумерное множество показателей мера неопределенности / риск.

В обзорной публикации [9] также исследованы варианты классификации транспортных рисков, принятые в зарубежных транспортных компаниях на основе матрицы рисков. Что касается минимизации рисков с учетом затрачиваемых ресурсов, то автор указанной ранее работы ограничивается замечанием о важности «грамотных проектных решений». В публикации [10], имеющей, в некоторой степени декларативный характер, в части обсуждения вероятностных аспектов риск-менеджмента на транспорте тема ограничивается общепринятой дефиницией «риск есть влияние неопределенности на цели», а также отмечается важность использования экспертных оценок в ситуациях коротких выборов: *«...чем прочнее изделие, тем труднее становится статистическая проверка гарантированного уровня надежности»* [10, с. 152].

В целом можно сделать вывод о том, что в исследованиях по управлению рисками на водном транспорте до последнего времени преобладали финансово-экономические подходы, а объектами управления выступали экономические показатели и факторы риска. При этом следует отметить, что в некоторых публикациях количественное оценивание рисков, возникающих при функционировании транспортных систем (в том числе авиационных и железнодорожных), и управление этими рисками рассматривается в концепции математического моделирования. Так, в работах [12], [13] для оценивания в транспортных системах рисков, последовательно проявляемых в цепочке причин и следствий, строится дискретная модель цепей случайных событий.

Начиная с 2013 г. в научной школе ГУМРФ по тематике управления рисками на водном транспорте появился ряд публикаций, связанных с применением математического моделирования и IT-технологий к задачам анализа и минимизации рисков. Так, в работе [14] обсуждается возможный метод построения диагностических систем идентификации рисков в контуре автоматизированного управления на основе выборочного анализа данных. Статья [15] посвящена алгоритмизации и на этой основе программированию соответствующего функционального модуля для управления рисками при проведении дноуглубительных работ. При построении матрицы рисков оценок авторами публикации последовательно применяются экспертные оценки, что является предметом рассмотрения и настоящей статьи. Методологической основой отыскания экстремальной (критической) цепочки последовательных реализаций риск-факторов выбрана теория ациклических графов. Схожий методологический подход представлен в работах [11] и [16], где строится математическая модель задачи определения критической (по средней величине ожидаемых потерь) цепочки потенциально реализуемых рисков.

В целом на основе анализа отраслевых и общенаучных публикаций можно сделать вывод о том, что проблема риск-менеджмента в системах водного транспорта все еще недостаточно изучена. В первую очередь это касается методов, основанных на применении математического моделирования, в том числе оптимизационного математического программирования.

Пусть k — оптимизируемый показатель качества функционирования технической системы (например, техническая надежность либо (в экономической интерпретации) объем однородной продукции, прибыль и т. п.), $X = (x_1, \dots, x_n)$ — набор независимых статистически влияющих на k факторов, целевая функция являющаяся уравнением множественной регрессии (например, линейной или квадратичной):

$$k = f(X). \quad (1)$$

Далее $\delta_i = [a_i, b_i]$ — отрезок, на котором функция Φ_i распределения значений фактора x_i принимает ненулевые значения, либо δ_i — априорно (экспертно) назначаемый отрезок. При этом имеем ограничение

$$x_i \in \delta_i. \quad (2)$$

На практике в первом случае, естественно, следует исходить либо из нормального распределения и задания интервала δ_i по правилу «трех сигм», либо из эмпирической функции распределения, полученной по выборке соответствующего фактора. Декартово произведение $\Phi = \prod_{i=1}^n \delta_i$ — исходное фазовое пространство факторов, $K = f(\Phi) \subset R$ — множество значений оптимизируемого показателя.

Введем понятие *порогового среза отрезка* δ_i , задаваемого в виде ${}_{\pi}\delta_i = \{x_i / P(x_i \in \delta_i) \geq \pi\}$, где $\pi \in (0, 1)$ — назначаемое экспертным путем (варьируемое в ходе машинного эксперимента) пороговое значение вероятности. Декартово произведение ${}_{\pi}\Phi = \prod_{i=1}^n {}_{\pi}\delta_i$ — соответствующий пороговый срез фазового пространства.

Задачу математического программирования:

$$f(x_1, \dots, x_n) \rightarrow \max, \quad (3)$$

при ограничениях вида

$$x_i \in {}_{\pi}\delta_i \quad (4)$$

назовем *нечеткой оптимизационной моделью*, чтобы отделить ее от ситуации четкой оптимизации, когда ограничения имеют вид $x_i \in \delta_i$.

В дальнейшем для определенности будем рассматривать оптимизацию системного показателя k как его максимизацию, а целевую функцию f предполагать выпуклой вверх. Тогда максимум ее значений достигается во внутренней точке выпуклого множества ${}_{\pi}\Phi$ так, что как поиск оптимума, так и анализ модели можно выполнять градиентным методом.

По аналогии с понятием точки безубыточности в теории экономики предприятия [3], [4], когда последнее функционирует с нулевой прибылью, назовем точкой минимально допустимой эффективности (МДЭ) технической системы по критерию (1) значение $k_{\min}^e \in K$ — минимально допустимое (по технологическим условиям или требованиям внешней среды) значение критерия k . В рассматриваемой экономической ситуации и в исследуемом случае оптимизации по техническому критерию рассматриваемая изолированно точка МДЭ, как и точка безубыточности, является недостаточно информативной для принятия управляющих решений, поскольку значение $k_{\min}^e$ может достигаться в различных точках фазового пространства ${}_{\pi}\Phi$. Пусть $\Phi_{\min}^e = f^{-1}(k_{\min}^e)$ — аналог точки МДЭ.

Естественно считать целевую функцию f непрерывной по каждому аргументу, так что $\Phi_{\min}^e$ — декартово произведение отрезков, как и его пересечение с ${}_{\pi}\Phi$, которое обозначим через ${}_{\pi}A$ и назовем *областью сильной неустойчивости*:

$${}_{\pi}A = {}_{\pi}\Phi \cap \Phi_{\min}^e = \prod_{i=1}^n {}_{\pi}\alpha_i,$$

где ${}_{\pi}\alpha_i$ — соответствующие отрезки.

При непрерывном изменении точки X внутри множества ${}_{\pi}A$ либо вблизи него, т. е. «на пределе», траектория системы в пространстве $K \times {}_{\pi}\Phi$ соответствует заведомо неприемлемому риску

нестабильного поведения, поэтому в ограничениях оптимизационной задачи следует изолировать-ся от области ${}_{\pi}A$ в фазовом пространстве множеством ненулевой меры. Пусть $\lambda > 1$ — назначаемый экспертным путем (варьируемый при анализе модели) ограничитель риска.

Для реализации подхода совмещения концепции нечетких множеств [5], [6] и концепции экспертных оценок введем в рассмотрение множество

$${}_{\pi, \lambda}S = \{X / f(X) \geq \lambda f(k_{\min}^e), X \in {}_{\pi}\Phi\},$$

которое назовем *областью стабильности с сигнатурой* (π, λ) по критериальному показателю. В свою очередь, множество

$${}_{\pi, \lambda}B = \{X / f(X) < \lambda f(k_{\min}^e), X \in {}_{\pi}\Phi\} = {}_{\pi}\Phi / {}_{\pi, \lambda}S$$

естественно назвать *барьером неустойчивости*.

Поскольку в общем случае точка $X^{(0)} = (x_1^{(0)}, \dots, x_n^{(0)})$ глобального оптимума критерия f на всем пространстве Φ может отличаться от точек оптимума, достигаемых в области стабильности ${}_{\pi, \lambda}S$ с различными сигнатурами, назовем *точкой нечеткого оптимума* для соответствующей сигнатуры решение ${}_{\pi\lambda}X^{(0)} = ({}_{\pi\lambda}x_1^{(0)}, \dots, {}_{\pi\lambda}x_n^{(0)})$ задачи (3) с ограничениями вида

$$X \in {}_{\pi\lambda}S. \quad (5)$$

Тогда ${}_{\pi\lambda}k^{(0)} = f({}_{\pi\lambda}X^{(0)})$ — соответствующий оптимум.

Параметр λ назовем *рангом области стабильности*, а параметр π — *ее вероятностью*. Увеличивая при фиксированном π значение λ (уводя критерий от глобального оптимума, имеющего место при $\lambda = 1$, а систему — от области сильной неустойчивости), рассмотрим различные равновероятные сужающиеся нечеткие допустимые области ограничений (области стабильности ${}_{\pi, \lambda}S$), которым приписывается вероятность π , и получим соответствующий нечеткий оптимум ${}_{\pi\lambda}X^{(0)}$. В свою очередь, уменьшая при фиксированном λ значение π (уводя критерий от оптимума, имеющего место при $\lambda = 1$), как и при уменьшении λ , расширяем нечеткую область стабильности ${}_{\pi\lambda}S$.

В стандартном случае [3] экспертные оценки задаются в виде упорядоченного кортежа вероятностей, например, тройки значений: $0 < \pi_1 < \pi_2 < \pi_3 < 1$; при назначении π_1 должна учитываться малая информативность меньших значений вероятности, а при назначении π_3 — стохастическая в целом природа функционирования технической системы.

Пусть для трех значений вероятности: π_1, π_2, π_3 , и для трех значений ранга стабильности: $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$, принятых в качестве типичных, найдены соответствующие решения задачи (3), (5). Для осуществления традиционного при использовании экспертных оценок минимаксного подхода (как, например, в [2]) и соответствующей нечеткой оптимизации сравним $\min_{\lambda}(\max_{\pi} f({}_{\pi\lambda}k^{(0)})) = k_{ia}$ и $\max_{\lambda}(\min_{\pi} f({}_{\pi\lambda}k^{(0)})) = k_{ai}$.

В идеальном случае совпадения минимакса и максимина итоговая экспертная оценка области стабильности S определяется сигнатурой (π_u, λ_v) , на которой они достигаются:

$$S = {}_{\pi_u \lambda_v}S.$$

В ситуации несовпадения этих экстремумов, достигаемых для параметров (π', λ') и (π'', λ'') , соответственно, полагаем

$$S = {}_{\pi' \lambda'}S \cap {}_{\pi'' \lambda''}S.$$

В случае, когда определение области стабильности является долгосрочным прогнозом, априори возможны ситуации, когда исходные области изменения допустимых значений факторов δ_i у различных экспертов могут оказаться несовпадающими и даже иногда непересекающимися. Формализуя эту ситуацию для m экспертных оценок, имеем при каждом $l = 1, \dots, m$ соответствующий набор $\{\delta_i^{(l)}\}$. Применение для каждого из них изложенной ранее процедуры определения области стабильности для тех же сигнатур (π_u, λ_v) дает m наборов нечетких областей стабильности $\{{}_{\pi_u \lambda_v}S^{(l)}\}$ и определяемых ими нечетких оптимумов ${}_{\pi\lambda}k_i^{(0)}$.

Следует отметить, что не исключен случай, когда при некоторых l_1 и l_2 соответствующие исходные фазовые пространства Φ^{l_1} и Φ^{l_2} , полученные по схеме $\Phi^{(l)} = \prod_{i=1}^n \delta_i^{(l)}$, не пересекаются. Тогда пустым оказывается также полное пересечение по всем экспертным оценкам:

$$\tilde{\Phi} = \bigcap_{l=1}^m \Phi^{(l)}. \quad (8)$$

Рассмотрим вначале случай, когда $\tilde{\Phi}$ не пусто. Тогда применение описанной процедуры, но при этом использующей в качестве исходного фазового пространства $\tilde{\Phi}$ вместо прежнего Φ , приводит к прогнозу области стабильности $\tilde{S}$ по формулам (6), (7). Имеющее при этом место сужение области стабильности, обусловленное переходом к пересечению (8), представляется закономерным, поскольку прежние вероятности π_1, π_2, π_3 используются теперь для удаленного по горизонту прогноза.

Затем перейдем к случаю, когда пересечение (8) пусто. Рассматривая поочередно фазовые пространства Φ^l в качестве прежнего Φ и применяя схему (6), (7), получим описание прогнозной ситуации в виде матрицы

$$\left(\pi_{i\lambda_1} k_{ia}^{(1)}, \pi_{i\lambda_1} k_{ai}^{(1)}, \pi_{i\lambda_2} k_{ia}^{(2)}, \dots, \pi_{i\lambda_3} k_{ia}^{(3)} \right)$$

размера $m \times 18$ и набора m нечетких областей стабильности $_{\pi\lambda} S^{(l)}$, возможно непересекающихся при некоторых парах значений параметра l .

Для фиксированной сигнатуры (π_u, λ_v) в качестве прогноза области стабильности выберем максимальный по значению t набор областей с непустым общим пересечением:

$$_{\pi_u \lambda_v} S = _{\pi_u \lambda_v} S^{(l_1)} \cap _{\pi_u \lambda_v} S^{(l_2)} \cap \dots \cap _{\pi_u \lambda_v} S^{(l_t)}.$$

Если максимальное значение t достигается на нескольких наборах, не совпадающих хотя бы по одному из пересекаемых множеств, то представляется целесообразным выбрать пересечение, минимальное по объему. От обобщающего прогноза, усредненного по всем l, π, λ , в данном случае целесообразно отказаться ввиду его неопределенности.

Следует отметить, что предложенное здесь ранжирование нечетких множеств на основе (π, λ) -сигнатур может рассматриваться как возможная альтернатива (либо новое концептуальное дополнение) сформулированной в работе [1] фазовой дифференциации, различающей область неустойчивости и области неуверенной, удовлетворительной, устойчивой и полной стабильности.

Рассмотрим теперь задачу определения подходящей траектории динамики системы — траектории, сопрягающей движение к оптимуму и сохранение по возможности желательного уровня стабильности. Для критерия f при определенных его характеристиках в общем случае возможно попадание глобально оптимального набора факторов X на границу допустимой области (например, точки максимума для выпуклой вниз функции).

Пусть $X^{(1)} = (x_1^{(1)}, \dots, x_n^{(1)})$ — текущее состояние системы, лежащее в области стабильности S . Будем исходить из определенного шага по времени и полагать, что в следующий контрольный момент систему можно перевести в состояние, более близкое к оптимуму, либо не допустить снижение ее стабильности. При этом следует исходить из того, что любую реальную производственно-техническую систему невозможно одномоментно перевести в состояние оптимума, поскольку любая математическая модель неизбежно абстрагируется от многих привходящих обстоятельств, далеко не всегда допускающих количественное выражение.

Поскольку в малой окрестности точки $X^{(1)}$ направление максимальной скорости роста критерия f задается градиентом $grad^{(1)} = \left(\frac{\partial f}{\partial x_i}(X^{(1)}) \right)$ (в данном случае исходим из максимизации критерия), шагом h будем последовательно сдвигаться вдоль луча с направляющим вектором $grad^{(1)}$, исходящего из точки $X^{(1)}$: $X' = X^{(1)} + h \cdot grad^{(1)}$.

Если $f(X') \leq f(X^{(1)})$, то следуя бинарной стратегии, полагаем $h := h/2$ и заново вычисляем X' , закликая процесс. Если $f(X') > f(X^{(1)})$, то $X' := X' + h \cdot \text{grad}^{(1)}$ вплоть до получения точки X' , для которой $f(X') \leq f(X^{(1)})$. Теперь $X^{(2)}$ полагаем равным итоговой точке X' . Если окажется, что $X^{(2)} \notin S$, то значение шага h , при котором получена точка $X^{(2)}$, уменьшаем вдвое и повторяем всю процедуру заново. Ввиду выпуклости области S процесс заканчивается за конечное число шагов.

Следует отметить, что при отказе от предположения выпуклости критерия f последний может в общем случае быть многоэкстремальным, тогда описанная процедура соответствует приближению к локальному экстремуму. В данной ситуации целесообразно предварительно провести исследование на многоэкстремальность, вычисляя f на достаточно густой сетке точек, покрывающих выявленную область стабильности S .

Использование градиента для получения точки $X^{(2)}$ предполагает одновременное изменение каждого из факторов $x_i^{(1)}$ на соответствующую величину $\frac{\partial f}{\partial x_i} h$. Анализ модели может выполняться по отдельному фактору x_i с точки зрения его изолированного изменения при сохранении неизменными значений остальных факторов. В этом случае описанная ранее процедура применяется с использованием $\left(0, \dots, 0, \frac{\partial f}{\partial x_i}(X^{(1)}), 0, \dots, 0\right)$ в качестве направляющего вектора вместо градиента.

Следует отметить, что все ранее изложенное может, разумеется, применяться для отдельной сигнатуры (π_u, λ_v) и, соответственно, с заменой области стабильности S на $\pi_u \lambda_v S$.

Результаты исследования и их обсуждение (Research results and their discussion)

В результате исследования, проведенного для задачи управления риск-факторами нарушения стабильности функционирования технической воднотранспортной системы (строительно-восстановительные работы на водных путях, навигационная безопасность, диагностика силовых установок и т. д.), предложена концепция, основанная на формулировании оптимизационной задачи математического программирования, совмещаемой с экспертными прогнозными оценками для диапазонов изменения управляемых переменных. В рамках этой концепции даны формализованные определения:

- порогового среза фазового пространства риск-факторов;
- точки минимально допустимой эффективности;
- сигнатуры, совмещающей вероятность экспертных оценок с показателем стабильности как меры близости точек области к точке глобального оптимума;
- нечеткого оптимума;
- нечеткой области стабильности как подмножества фазового пространства.

Предложен метод управления на основе градиентного подхода, переводящий пошагово систему в состояние с улучшенным значением критериального показателя.

Заключение (Conclusion)

Для обеспечения стабильности технической системы в автоматизированном контуре управления необходимо совместное рассмотрение качественных и количественных вероятностных оценок потенциальных рисков, снижающих стабильность. При этом развитие на водном транспорте человеко-машинных контуров управления делает актуальной проблему совмещения неформализуемого опыта экспертов с оптимизационными моделями. В рамках этой концепции предложен подход, в котором экспертные оценки динамики факторов (управляемых переменных) и значение глобального оптимума критериального показателя стабильности совместно определяют область фазового пространства с минимально допустимым уровнем критерия.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Каретников В. В. К вопросу оценки рисков на внутреннем водном транспорте Российской Федерации / В. В. Каретников, К. И. Ефимов, А. А. Сикарев // Вестник Астраханского Государственного технического университета. Серия: Морская техника и технология. — 2017. — № 2. — С. 22–27. DOI: 10.24143/2073-1574-2017-2-22-27.
2. Панфилов А. В. Система адаптивного дистанционного мониторинга и контроля эксплуатации опасных объектов на основе риск-ориентированного подхода // А. В. Панфилов, О. А. Бахтеев, В. В. Дерюшев, А. А. Короткий // Безопасность техногенных и природных систем. — 2020. — № 2. — С. 19–29. DOI: 10.23947/2541-9129-2020-2-19-29.
3. Щепетова В. Н. О необходимости учета, анализа и оценки рисков в деятельности предприятий водного транспорта / В. Н. Щепетова, К. С. Шамонина // Вестник Волжской государственной академии водного транспорта. — 2014. — № 41. — С. 74–80.
4. Шамонина К. С. Матрица рисков предприятий водного транспорта / К. С. Шамонина, В. Н. Щепетова // Вестник Волжской государственной академии водного транспорта. — 2016. — № 48. — С. 197–202.
5. Броневиц А. Г. Нечеткие модели анализа данных и принятия решений / А. Г. Броневиц, А. Е. Лепский; Нац. исслед. ун-т «Высшая школа экономики». — М.: Изд. дом Высшей школы экономики, 2022. — 264 с.
6. Рыбин В. В. Основы теории нечетких множеств и нечеткой логики / В. В. Рыбин. — М.: МАИ, 2007. — 96 с.
7. Пупышев Н. Н. Сценарный подход при оценке уровня безопасности СГТС / Н. Н. Пупышев // Наука и техника на речном транспорте. — 2003. — С. 44–48.
8. Белый О. В. Оценка безопасности транспортных систем на основе моделей рисков возникновения катастрофических событий / О. В. Белый, Ф. М. Кацман, Е. А. Куклев // Транспорт Российской Федерации. — 2005. — № 1 (1). — С. 62–63.
9. Латыпова Р. Р. Классификация и виды транспортных рисков / Р. Р. Латыпова // Вестник Северо-Кавказского федерального университета. — 2016. — № 1 (52). — С. 71–76.
10. Рябинин И. А. Логико-вероятностный анализ проблем надежности, плавучести и безопасности / И. А. Рябинин. — СПб.: Политехника, 2009. — 600 с.
11. Куклев Е. А. Оценивание рисков на основе цепей случайных событий / Е. А. Куклев // Наука и техника на транспорте. — М.: РАТИ, 2003.
12. Куклев Е. Л. Модели рисков катастроф как маловероятных событий в системах с дискретными состояниями / Е. Л. Куклев // Сб. трудов международной конференции «Системный анализ и моделирование». — СПб.: ЛЭТИ, 2003. — С. 74–79.
13. Куклев Е. А. Оценивание безопасности эксплуатации аэрокосмических комплексов на основе рисков, определенных в нечетких множествах / Е. Л. Куклев // Проблемы и перспективы развития авиации, наземного транспорта и энергетики «АНТЭ-2015». Международная научно-техническая конференция: материалы конф. — Казань: Издательство «Бриг», 2015. — С. 296–301.
14. Veselkov V. Development of Methods to Identify Risks to Build up the Automated Diagnosis Systems / V. Veselkov, N. Vikhrov, A. Nyrkov, S. Chernyi, I. Titov // 2017 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus). — IEEE, 2017. — Pp. 598–601. DOI: 10.1109/EIConRus.2017.7910625.
15. Mamunts D. Models and algorithms for estimation and minimization of the risks associated with dredging / D. Mamunts, S. Sokolov, A. Nyrkov, S. Chernyi, M. Bukhurmetov, V. Kuznetsov // Transport and Telecommunication. — 2017. — Vol. 18. — Is. 2. — Pp. 139. DOI: 10.1515/ttj-2017-0013.
16. Нырков А. П. Модели, алгоритмы и программное обеспечение минимизации рисков мультимодальных перевозок / А. П. Нырков, А. А. Нырков // Вестник государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2013. — № 1 (20). — С. 67–73.

REFERENCES

1. Karetnikov, Vladimir Vladimirovich, Konstantin Ivanovich Efimov, and Alexander Aleksandrovich Sikarev. "To the question of risk assessment on domestic water transport of the Russian Federation." *Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Marine engineering and technologies* 2 (2017): 22–27.
2. Panfilov, A. V., O. A. Bakhteyev, V. V. Deryushev, and A. A. Korotkiy. "Adaptive remote monitoring and control system for the operation of hazardous facilities based on a risk-based approach." *Safety of Technogenic and Natural System* 2 (2020): 19–29.
3. Schepetova, V. N., and K. S. Shamonina. "About the necessity of accounting, analysis and evaluation of risks in activity of the enterprises of inland water transport." *Bulletin of VSAWT* 41 (2014): 74–80.

4. Shamonina, K. S., and V. N. Shepetova. "Internal water transport enterprises risk matrix." *Bulletin of VSAWT* 48 (2016): 197–202.
5. Bronevich, A. G., and A. E. Lepskii. *Nechetkie modeli analiza dannykh i prinyatiya reshenii*. M.: Izd. dom Vysshei shkoly ekonomiki, 2022.
6. Rybin, V. V. *Osnovy teorii nechetkikh mnozhestv i nechetkoi logiki*. M.: MAI, 2007.
7. Pupyshchev, N. N. "Stsenarnyi podkhod pri otsenke urovnya bezopasnosti SGTS." *Nauka i tekhnika na rechnom transporte* (2003): 44–48.
8. Belyi, O. V., F. M. Katsman, and E. A. Kuklev. "Otsenka bezopasnosti transportnykh sistem na osnove modelei riskov vozniknoveniya katastroficheskikh sobytii." *Transport of the Russian Federation* 1(1) (2005): 62–63.
9. Latypova, Ramilya. "Classification and types of transport risks." *Newsletter of North-Caucasus Federal University* 1(52) (2016): 71–76.
10. Ryabinin, I. A. *Logiko-veroyatnostnyi analiz problem nadezhnosti, plavuchesti i bezopasnosti*. SPb.: Politehnika, 2009.
11. Kuklev, E. A. "Otsenivanie riskov na osnove tsepei sluchainykh sobytii." *Nauka i tekhnika na transporte*. M.: RATI, 2003.
12. Kuklev, E. L. "Modeli riskov katastrof kak maloveroyatnykh sobytii v sistemakh s diskretnymi sostoyaniyami." *Sb. trudov mezhdunarodnoi konferentsii «Sistemnyi analiz i modelirovanie»*. SPb.: LETI, 2003. 74–79.
13. Kuklev, E. "Simulation method for analysis of risk events and danger scenarios of crashes in aviation and cosmos systems." *Problemy i perspektivy razvitiya aviatsii, nazemnogo transporta i energetiki "ANTE-2015". Mezhdunarodnaya nauchno-tekhnicheskaya konferentsiya: Materialy konferentsii*. Kazan': Izdatel'stvo "Brig", 2015. 296–301.
14. Veselkov, Viacheslav, Nikolai Vikhrov, Anatolii Nyrkov, Sergei Chernyi, and Ivan Titov. "Development of methods to identify risks to build up the automated diagnosis systems." *2017 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIconRus)*. IEEE, 2017. 598–601. DOI: 10.1109/EIconRus.2017.7910625.
15. Mamunts, D., S. Sokolov, A. Nyrkov, S. Chernyi, M. Bukhurmetov, and V. Kuznetsov. "Models and algorithms for estimation and minimization of the risks associated with dredging." *Transport and Telecommunication* 18.2 (2017): 139. DOI: 10.1515/ttj-2017-0013.
16. Nyrkov, A. P., and A. A. Nyrkov. "Models, algorithms and software for risks minimizing of multimodal transportations." *Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 1(20) (2013): 67–73.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Ястребов Михаил Юрьевич —
 кандидат экономических наук, доцент
 ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала
 С. О. Макарова»
 198035, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург,
 ул. Двинская, 5/7
 e-mail: mikyast@gmail.com, kaf_math@gumrf.ru
Комиссаров Пётр Вениаминович — аспирант
Научный руководитель:
 Колесниченко Сергей Викторович
 ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала
 С. О. Макарова»
 198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
 ул. Двинская, 5/7
 e-mail: Komissarovp@yandex.ru
Колесниченко Сергей Викторович —
 доктор технических наук, профессор
 ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала
 С. О. Макарова»
 198035, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург,
 ул. Двинская, 5/7
 e-mail: kaf_mathmod@gumrf.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Yastrebov, Mikhail Yu. —
 PhD, associate professor
 Admiral Makarov State University of Maritime
 and Inland Shipping
 5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg, 198035,
 Russian Federation
 e-mail: mikyast@gmail.com, kaf_math@gumrf.ru
Komissarov, Peter V. — Postgraduate
Supervisor:
 Kolesnichenko, Sergey V.
 Admiral Makarov State University of Maritime
 and Inland Shipping
 5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg, 198035,
 Russian Federation
 e-mail: Komissarovp@yandex.ru
Kolesnichenko, Sergey V. —
 Dr. of Technical Sciences, professor
 Admiral Makarov State University of Maritime
 and Inland Shipping
 5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg, 198035,
 Russian Federation
 e-mail: kaf_mathmod@gumrf.ru

Статья поступила в редакцию 10 апреля 2023 г.
 Received: April 10, 2023.