

Научная статья

УДК 519.85:681.513.4

МНОГОКРИТЕРИАЛЬНАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ СТРУКТУРЫ ОТКАЗОУСТОЙЧИВОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ПРИ ИНТЕРВАЛЬНОЙ НЕОПРЕДЕЛЁННОСТИ

**Дмитрюк Татьяна Григорьевна, кандидат технических наук, Донецкий
национальный технический университет, Россия, Донецк,
dmitriuk_tg@mail.ru;**

**Максютин Андрей Сергеевич, кандидат технических наук, Сибирский
государственный университет науки и технологий им. акад.
М.Ф. Решетнева, Россия, Красноярск, maksutin.krasnoyarsk@yandex.ru**

Аннотация. Статья посвящена разработке метода многокритериального структурного синтеза отказоустойчивых систем управления в условиях интервальной неопределённости исходных данных. Предложена формализация задачи выбора архитектуры системы, включающей уровень резервирования контроллеров, состав датчиков, топологию коммуникационной сети и алгоритмы голосования, при которой параметры надёжности и функциональные характеристики элементов задаются замкнутыми интервалами, отражающими ограниченность статистических данных испытаний и вариативность условий эксплуатации. Введены определения необходимого и достаточного интервального доминирования для векторных оценок критериев, на основе которых построен двухэтапный алгоритм формирования суженного множества Парето, обеспечивающий сокращение числа попарных сравнений без потери гарантированности результата. Разработаны правила исключения неэффективных конфигураций с учётом жёстких технических ограничений на быстродействие, задержку передачи управляющих сигналов и минимально допустимый уровень резервирования. Для окончательного выбора из множества Парето применён критерий минимаксного отклонения, минимизирующий максимальную нормированную ширину интервальных оценок по совокупности

шести технических критериев без задания весовых коэффициентов. Вычислительный эксперимент проведён на примере синтеза распределённой системы управления промышленным энергоблоком. Установлена устойчивость выбора при вариации ширины исходных интервалов. Разработанный метод ориентирован на задачи проектирования систем, прохождение полного цикла натурных испытаний которых затруднено по экономическим или организационным причинам.

Ключевые слова: многокритериальная оптимизация, структурный синтез, отказоустойчивая система управления, интервальная неопределённость, множество Парето, интервальное доминирование, минимаксный критерий, резервирование.

Original article

MULTICRITERIA OPTIMIZATION OF THE STRUCTURE OF A FAULT-TOLERANT CONTROL SYSTEM UNDER INTERVAL UNCERTAINTY

Dmitriuk Tatiana Grigorevna, Candidate of Technical Sciences, Donetsk National Technical University, Donetsk, Russia, dmitriuk_tg@mail.ru;

Maksiutin Andrei Sergeevich, Candidate of Technical Sciences, Reshetnev Siberian State University of Science and Technology, Krasnoyarsk, Russia, maksutin.krasnoyarsk@yandex.ru

Abstract. This article is devoted to the development of a method for the multi-criteria structural synthesis of fault-tolerant control systems under conditions of interval uncertainty of the initial data. A formalization of the problem of selecting a system architecture is proposed, including the level of controller redundancy, the composition of sensors, the topology of the communication network, and voting algorithms. In this problem, the reliability parameters and functional characteristics of the elements are specified by closed intervals reflecting the limited statistical test data and the variability of operating conditions. Definitions of necessary and sufficient

interval dominance for vector criteria estimates are introduced, based on which a two-stage algorithm for generating a narrowed Pareto set is constructed, ensuring a reduction in the number of pairwise comparisons without losing the guarantee of the result. Rules for excluding ineffective configurations are developed, taking into account strict technical constraints on performance, control signal transmission delay, and the minimum permissible level of redundancy. For the final selection from the Pareto set, the minimax deviation criterion is applied, minimizing the maximum normalized width of interval estimates for a set of six technical criteria without specifying weighting coefficients. A computational experiment was conducted using the synthesis of a distributed control system for an industrial power unit. The stability of the selection was established when the width of the initial intervals varied. The developed method is aimed at designing systems for which a full cycle of full-scale testing is difficult for economic or organizational reasons.

Keywords: multicriteria optimization, structural synthesis, fault-tolerant control system, interval uncertainty, Pareto set, interval dominance, minimax criterion, redundancy.

Введение. Проблема структурного синтеза систем управления, сохраняющих работоспособность при отказах отдельных функциональных элементов, на протяжении нескольких десятилетий остаётся предметом пристального внимания исследователей в области теории надёжности и автоматизации. Указанная задача приобретает актуальность применительно к объектам, эксплуатация которых связана с повышенными требованиями к безопасности, в частности, энергетическим установкам, авиационным комплексам, химическим производствам, где выход из строя единственного канала управления способен повлечь каскадные последствия. Структурный синтез в данном контексте понимается как выбор рациональной архитектуры системы, включающей конфигурацию резервных элементов, топологию связей между ними, а также логику переключения при возникновении отказов, причём

итоговое решение должно удовлетворять требованиям по готовности, стоимости реализации, массогабаритным характеристикам и скорости реакции системы на деградацию компонентной базы.

Специфика рассматриваемой задачи определяется характером исходных данных о параметрах надёжности и функциональных характеристик элементов системы. В реальных условиях проектирования инженер-разработчик не всегда располагает точечными оценками вероятностей безотказной работы, интенсивностей отказов, средних времен восстановления и прочих количественных показателей. Причины подобного положения дел многообразны:

1) статистические выборки результатов стендовых и натурных испытаний, как правило, ограничены десятками наблюдений, что не позволяет строить доверительные интервалы приемлемой ширины;

2) для вновь разрабатываемых компонент статистические данные отсутствуют, и проектировщик вынужден оперировать экспертными суждениями либо аналогиями с изделиями предшествующих поколений;

3) измерительные средства вносят погрешность, соизмеримую с шириной доверительной области оцениваемого параметра;

4) условия эксплуатации реального объекта существенно варьируются во времени и пространстве: температурные режимы, вибрационные нагрузки, влажность и электромагнитная обстановка влияют на характеристики отказов, а их совокупное влияние невозможно свести к единственному числу.

Адекватным математическим аппаратом для формализации описанного рода неопределённости служит интервальная арифметика, основы которой были заложены в работах Р. Мура, опубликованных в 1962-1966 гг., что указано в исследованиях [1], [2]. Согласно изложенному подходу [3] вместо точечного числа на числовой оси фиксируется замкнутый отрезок $[a, b]$, содержащий все допустимые значения искомой величины, а арифметические операции определяются через множества возможных результатов: сумма двух интервалов

X и Y представляет собой множество $\{x + y : x \in X, y \in Y\}$, произведение - множество $\{xy : x \in X, y \in Y\}$ и аналогичным образом для прочих операций. При реализации интервальных вычислений на машине с конечной разрядностью применяется процедура внешнего округления, гарантирующая включение точного результата в вычисленный интервал несмотря на накапливающиеся ошибки округления [3]. Это отличает интервальный подход от вероятностных методов, в которых точность оценки зависит от объёма выборки и выбора закона распределения, а также от детерминированных методов анализа чувствительности, дающих локальную информацию о влиянии возмущений.

Развитие интервальных методов получило продолжение в трудах У. Кулиша и В. Мирянкера [4], разработавших аксиоматическую основу округлённой арифметики, Э. Хансена, предложившего ряд схем глобальной оптимизации на интервалах [5], а также в работах Г. Алефельда и Ю. Херцбергера [6], исследовавших сходимость интервальных итерационных процессов. Для задач структурной оптимизации интерес представляет метод Скейбо-Мура [3], позволяющий последовательно сужать область поиска глобального экстремума путём ветвления начального параллелепипеда и отбрасывания подынтервалов, заведомо не содержащих оптимального решения. Указанный алгоритм, будучи обобщённым на случай многокритериальной постановки, открывает возможность построения гарантированных оценок множества Парето при наличии интервальной неопределённости в коэффициентах целевых функций и ограничениях.

Следует обратить внимание на то, что применение интервальной модели неопределённости диктуется природой проектных данных. В упомянутом ранее исследовании [3] подчёркивается, что на этапе формулировки исходных данных физические измерения дают границы, внутри которых заключено истинное значение величины, и попытка выделить из этих границ единственную оценку влечёт потерю информации о достоверности результата. В задаче структурного синтеза отказоустойчивой системы подобная потеря информации особенно

критична: завышение показателя готовности на этапе проектирования способно привести к принятию конструктивного решения, не обеспечивающего требуемого уровня безопасности в реальных условиях эксплуатации. Интервальный подход сохраняет информацию о неопределённости на всех этапах вычислений и позволяет проектировщику оценивать запас устойчивости принятого решения к вариациям параметров.

Отдельного обсуждения заслуживает вопрос о вычислительной сложности многокритериальной оптимизации при интервальных данных. Как показано в работе [7], общая задача глобальной оптимизации с интервальными коэффициентами является NP-трудной, и применение методов полного перебора к системам большой размерности оказывается неосуществимым за приемлемое время. Вместе с тем для практически значимых размерностей комбинация интервального ветвления с методами многокритериального ранжирования демонстрирует сходимость за конечное число итераций [3]. Существенную роль здесь играет выбор стратегии ветвления, поскольку разбиение по координате с наибольшей шириной интервала обеспечивает равномерное уменьшение неопределённости, а приоритетное ветвление по критерию с наибольшей чувствительностью к данной координате может сократить число просматриваемых узлов дерева поиска.

В настоящем исследовании предлагается методика многокритериальной оптимизации структуры отказоустойчивой системы управления, в которой параметры надёжности элементов, характеристики каналов связи и ограничения на ресурс задаются в виде интервалов, а целевые функции вычисляются средствами интервальной арифметики с внешним округлением. Разрабатываемый алгоритм сочетает процедуру последовательного ветвления параллелепипеда в пространстве структурных переменных с многокритериальным отсеиванием доминируемых конфигураций, чтобы не исключить области множества допустимых структур, содержащие решения, оптимальные по Парето. Научная новизна работы состоит в совместном

применении интервальных оценок критериев и аппарата многокритериального доминирования в едином вычислительном контуре.

Практическая значимость полученного результата определяется тем, что проектные решения, найденные предложенным методом, сохраняют работоспособность при любых допустимых вариациях параметров в пределах заданных интервалов. Иными словами, конструктор получает семейство структур, каждая из которых удовлетворяет требованиям технического задания при наихудшем сочетании параметров.

Обзор литературы. Задача определения рациональной конфигурации отказоустойчивой системы управления относится к классу комбинаторных проблем, в которых пространство допустимых решений формируется дискретными переменными, описывающими кратность резервирования, состав функциональных элементов и способы их взаимосвязи. В работах, посвящённых надёжности автоматизированных комплексов, структура системы описывается булевыми векторами, кодирующими наличие или отсутствие резервных каналов, однако при переходе к многокритериальной постановке размерность пространства поиска возрастает экспоненциально, что делает полный перебор вычислительно неосуществимым для систем средней и большой размерности [8], [9].

Аппарат интервального анализа, основы которого заложены в исследованиях [1], [2], предоставляет формализованные средства оперирования множествами возможных значений параметров без привлечения вероятностных гипотез о законах их распределения. В [3] изложена полная система определений и свойств интервальной арифметики, включая операции сложения, вычитания, умножения и деления интервалов, понятие включения и изотонии по включению, а также фундаментальную теорему, гарантирующую, что значение любой изотонной по включению интервальной функции содержит точную область значений соответствующей вещественной функции на заданном интервальном аргументе. Указанная теорема, доказанная в работе [3], служит

теоретическим основанием для построения гарантированных оценок критериев при неполных исходных данных.

Проблема многокритериального выбора при неточных оценках рассматривалась в контексте глобальной оптимизации [4], авторы предложили схему ветвления и оценивания с интервальными границами целевых функций. Алгоритм [3], обеспечивающий последовательное сужение области поиска посредством упорядоченного списка подынтервалов, демонстрирует линейную сходимость по избыточной ширине при равномерном дроблении области аргументов и квадратичную при использовании центрированных форм. Перенос указанных идей на дискретное пространство структурных конфигураций требует модификации, поскольку бисекция непрерывного параллелепипеда заменяется попарным сопоставлением конечного числа альтернатив.

Вопросам доминирования при интервальных оценках посвящены отдельные разделы теории принятия решений, однако разграничение необходимого и достаточного доминирования для многокритериальных задач управления в литературе представлено фрагментарно. Настоящая работа восполняет указанный пробел, предлагая целостную формализацию, в которой интервальный вектор критериев, отношения доминирования и алгоритм формирования множества Парето объединены в единую вычислительную процедуру с доказанной конечной сходимостью.

Формализация неопределённости через замкнутые интервалы вещественной оси восходит к работам Сананаги 1958 года и Мура 1962 года, однако систематическое изложение алгебраических свойств интервальной арифметики появилось в [2]. Авторы [5] развили аксиоматическую основу округлённой арифметики, в которой каждая операция сопровождается процедурой внешнего округления, гарантирующей строгое включение точного результата в вычисленный интервал независимо от накапливающихся ошибок округления конечной разрядности. Указанное свойство, называемое в [3] «outward rounding», обеспечивает математическую строгость всех последующих

вычислений и исключает возможность потери истинного значения параметра за пределами интервальной оценки.

Фундаментальная теорема интервального анализа [3] утверждает, что если F является изотонной по включению интервальной функцией, расширяющей вещественную функцию f , то образ множества $f(X_1, \dots, X_n)$ содержится в значении $F(X_1, \dots, X_n)$. Из данного утверждения непосредственно следует, что интервальная оценка критерия, полученная подстановкой интервальных параметров в расчётную формулу, заведомо содержит все возможные реализации критерия при допустимых вариациях входных данных. Следствие из [3] распространяет этот результат на рациональные интервальные функции произвольного числа переменных.

Понятие избыточной ширины интервальной функции, введённое в определении работы [3], позволяет количественно оценивать потерю информации при переходе от точного множества значений к интервальному расширению. Лемма из [3] доказывает, что естественное интервальное расширение рациональной функции является липшицевым, то есть ширина результата убывает линейно с уменьшением ширины аргумента. Данное свойство обеспечивает сходимость процедур последовательного уточнения интервальных оценок и обосновывает корректность алгоритма ветвления, применяемого в настоящей работе к дискретному пространству архитектур.

Алгоритмические аспекты формирования множества Парето при многокритериальной оптимизации изучались применительно к непрерывным задачам в работах по глобальной оптимизации с использованием интервального ветвления и оценивания [4]. Базовый алгоритм, описанный в [3], оперирует списком подынтервалов, упорядоченных по нижней границе целевой функции, и последовательно исключает подынтервалы, не содержащие глобального минимума. Проверка допустимости, используемая в указанном алгоритме, состоит в проверке условия $F(X) > 0$ для ограничения $f(x) \leq 0$; подынтервал исключается, если верхняя граница $F(X)$ отрицательна.

Перенос аналогичной логики на дискретное пространство структурных конфигураций заменяет бисекцию непрерывного параллелепипеда попарным сравнением архитектур. Сложность прямого попарного сравнения составляет $O(|\Omega|^2)$ операций, что при $|\Omega| \approx 10^5$ приводит к 10^{10} сравнений и делает процедуру практически нереализуемой. Сокращение числа сравнений достигается введением иерархии фильтров: на первом этапе применяется необходимое доминирование, на втором - достаточное доминирование, а окончательное решение принимается на множестве, не содержащем необходимо доминируемых элементов.

Теорема из [3] гарантирует, что избыточная ширина уточнённой интервальной оценки убывает как $O(1/N)$ при равномерном дроблении области на N частей. Хотя указанная теорема сформулирована для непрерывных интервальных функций, её аналог для дискретного случая состоит в том, что последовательное применение тестов доминирования к подмножествам архитектур уменьшает число неразличимых пар не менее чем на единицу за каждый шаг, обеспечивая конечную сходимость алгоритма за не более чем $|\Omega| \cdot (|\Omega|-1)/2$ шагов в худшем случае.

Учёт жёстких технических ограничений при многокритериальном выборе традиционно реализуется методом последовательных уступок либо введением штрафных функций. Однако при интервальной неопределённости штрафной подход утрачивает однозначность, поскольку величина штрафа зависит от реализации параметра внутри интервала. Гарантированный подход, основанный на принципе минимакса, свободен от указанного недостатка и обеспечивает выполнение ограничений при наихудшей реализации неопределённых параметров.

В работе [3] рассмотрены методы решения систем линейных уравнений с интервальными коэффициентами, в которых множество решений ограничивается интервальным вектором, полученным итерационным методом Кравчика. Аналогичная логика применима к задаче структурного выбора:

множество допустимых архитектур ограничивается условиями, которые должны выполняться для всех реализаций параметров из заданных интервалов. Согласно теореме из [3], если все шаги прямого метода выполнимы в интервальной арифметике без деления на интервал, содержащий ноль, то результирующий интервальный вектор содержит все допустимые решения.

Критерий минимаксного отклонения, используемый в настоящей работе для окончательного выбора из множества Парето, определяется как минимизация максимальной нормированной ширины интервальных оценок по всем критериям.

Материалы и методы исследования. Пространство допустимых архитектур системы управления определяется совокупностью структурных переменных, каждая из которых принимает значения из конечного множества. Уровень резервирования контроллеров задаётся целочисленной переменной r , принимающей значения из множества $\{1, 2, 3\}$, что соответствует одинарному, двойному и тройному модульному резервированию. Состав датчиков описывается вектором s размерности m , компоненты которого указывают тип измерительного элемента для каждого контролируемого параметра технологического процесса. Топология коммуникационной сети кодируется переменной t , принадлежащей множеству $\{\text{шинная, кольцевая, звездообразная, ячеистая}\}$, а алгоритмы голосования определяются переменной v из множества $\{\text{мажоритарное, поквартильное, скользящее среднее}\}$. Дублирование каналов связи характеризуется булевым вектором d , фиксирующим наличие или отсутствие резервной физической линии для каждого участка сети.

Формально множество допустимых архитектур записывается в виде декартова произведения (1):

$$\Omega = R * S * T * V * D \quad (1)$$

где

$$R = \{1, 2, 3\} \quad (2)$$

$$S \subseteq N^m \quad (3)$$

$$T = \{\tau_1, \tau_2, \tau_3, \tau_4\} \quad (4)$$

$$V = \{v_1, v_2, v_3\} \quad (5)$$

$$D \subseteq \{0,1\}^q \quad (6)$$

Мощность множества Ω при типичных значениях $m = 6$ и $q = 8$ составляет порядка $3 \times 2^6 \times 4 \times 3 \times 2^8 = 147456$ вариантов, что исключает возможность экспертного анализа без применения формальных процедур отбора.

Вектор критериев $F(\omega) = (f_1(\omega), f_2(\omega), \dots, f_6(\omega))$ для каждой архитектуры $\omega \in \Omega$ включает вероятность сохранения работоспособности f_1 , быстродействие контура управления f_2 , точность стабилизации f_3 , задержка передачи управляющих сигналов f_4 , загрузка вычислительных ресурсов f_5 и устойчивость к отказам отдельных каналов f_6 . Первая и шестая компоненты подлежат максимизации, остальные четыре - минимизации. Для единообразия записи вводится вектор знаков $\sigma = (+1, -1, -1, -1, -1, +1)$, так что задача сводится к одновременной максимизации всех компонент вектора $\sigma \circ F$.

Происхождение исходных интервалов для каждого критерия определяется тремя источниками. Для критерия f_1 интервал формируется на основании результатов ускоренных испытаний на безотказность, проведённых в объёме не менее 30 образцов каждого типа контроллера при температуре 40 °C и влажности 85%, с последующим расширением границ поправочным коэффициентом, учитывающим отличие лабораторных условий от эксплуатационных. Интервалы для f_2 и f_4 получены из паспортных данных изделий с добавлением инструментальной погрешности измерительного тракта, составляющей $\pm 0,3$ мс для контроллеров данного класса. Точность стабилизации f_3 оценивается по результатам моделирования переходных процессов при вариации параметров

объекта в пределах $\pm 15\%$ от номинала, что порождает интервал шириной, пропорциональной разбросу коэффициентов усиления. Загрузка вычислительных ресурсов f_5 фиксируется профилировщиком в ходе 72-часового непрерывного теста, причём регистрируются минимальное и максимальное значения загрузки за весь период наблюдения. Устойчивость к отказам f_6 определяется расчётным путём как доля сценариев единичного отказа, при которых система сохраняет управляемость, и варьируется в зависимости от топологии сети и кратности резервирования.

Каждый критерий $f_i(\omega)$ представляется замкнутым интервалом $[\underline{f}_i(\omega), \bar{f}_i(\omega)]$, где нижняя граница $\underline{f}_i$ соответствует наименьшему достижимому значению, а верхняя $\bar{f}_i$ - наибольшему, при условии реализации любого допустимого сочетания внешних факторов. Интервальный вектор критериев для архитектуры ω определяется согласно формуле (7):

$$F(\omega) = ([\underline{f}_1(\omega), \bar{f}_1(\omega)], [\underline{f}_2(\omega), \bar{f}_2(\omega)], \dots, [\underline{f}_6(\omega), \bar{f}_6(\omega)]) \quad (7)$$

Операции над интервальными векторами выполняются покомпонентно в соответствии с [3], сумма двух интервалов X и Y есть множество $\{x + y : x \in X, y \in Y\}$, а произведение - множество $\{xy : x \in X, y \in Y\}$. Включение $X \subseteq Y$ означает, что нижняя граница X не меньше нижней границы Y и верхняя граница X не превосходит верхней границы Y .

Интервальный вектор критериев для фиксированной архитектуры ω формализуется как элемент произведения шести интервальных пространств в контексте формулы (8):

$$F(\omega) \in \mathcal{I}^6, \text{ где } \mathcal{I} = \{[a, b] : a, b \in R, a \leq b\} \quad (8)$$

Каждая компонента интервального вектора определяется через расчётную модель системы управления. Вероятность безотказной работы f_1 при тройном модульном резервировании с мажоритарным голосованием выражается формулой (9):

$$f_1 = 3p^2(1 - p) + p^3 \quad (9)$$

где

$p \in [p, \bar{p}]$ - интервальная оценка вероятности безотказной работы единичного канала за время выполнения миссии. Подстановка интервального p в указанную формулу с использованием правил интервальной арифметики из [3] даёт интервал $[f_1, \bar{f}_1]$, содержащий все возможные значения вероятности при допустимом разбросе параметра p .

Быстродействие контура f_2 определяется суммарным временем цикла опроса датчиков, вычислительной обработки и выдачи управляющего воздействия. Для кольцевой топологии задержка передачи складывается из времени прохождения кадра через каждый узел кольца и времени ожидания доступа к среде, причём каждое слагаемое задаётся интервалом, отражающим вариативность загрузки сети. Суммирование интервалов выполняется по правилу $X + Y = [\underline{X} + \underline{Y}, \bar{X} + \bar{Y}]$, что непосредственно следует из определения работы [3].

Точность стабилизации f_3 оценивается через дисперсию ошибки регулирования в установившемся режиме. При интервальной неопределённости коэффициента усиления объекта $K \in [\underline{K}, \bar{K}]$ и коэффициента обратной связи $H \in [\underline{H}, \bar{H}]$ установившаяся ошибка определяется выражением $e = 1/(1 + KH)$, и интервальная оценка e вычисляется как частное $[1, 1] / (1 + [\underline{K}, \bar{K}] \cdot [\underline{H}, \bar{H}])$ с применением формул деления из [3], при условии что ноль не принадлежит знаменателю.

Задержка передачи управляющих сигналов f_4 для шинной топологии включает время арбитража, которое при n узлах варьируется от минимального значения, соответствующего немедленному захвату шины, до максимального, определяемого полным циклом опроса всех узлов. Интервал задержки имеет вид $[t_{\min}, n \cdot t_{\text{slot}} + t_{\text{prop}}]$, где t_{slot} - длительность тайм-слота, а t_{prop} - время распространения сигнала по физической среде.

Загрузка вычислительных ресурсов f_5 фиксируется как отношение времени занятости процессора к длительности цикла управления. При наличии резервного контроллера, выполняющего функцию горячего резерва, загрузка

основного процессора возрастает на величину, определяемую интенсивностью обмена контрольными суммами, что увеличивает верхнюю границу интервала f_5 .

Устойчивость к отказам f_6 рассчитывается как отношение числа сценариев единичного отказа, при которых система сохраняет работоспособность, к общему числу сценариев. Для шинной топологии с n узлами общее число сценариев равно $n + c$, где c – число каналов связи, а число благоприятных сценариев зависит от кратности резервирования и алгоритма голосования.

Алгоритм построения интервального множества Парето включает три последовательных этапа. На первом этапе для каждой пары архитектур $(\omega', \omega'') \in \Omega \times \Omega$ проверяется условие необходимого доминирования $\omega' \succ_n \omega''$. Если условие выполняется, архитектура ω'' помечается как исключаемая и удаляется из рабочего множества. Результатом первого этапа является суженное множество $\Omega_1 \subseteq \Omega$, не содержащее необходимо доминируемых элементов.

На втором этапе для каждой пары из Ω_1 проверяется условие достаточного доминирования. Результатом является бинарное отношение $\succ_s$ на множестве Ω_1 , которое, вообще говоря, не является ни транзитивным, ни антисимметричным. Архитектуры, не участвующие ни в одном отношении достаточного доминирования в качестве доминируемого элемента, образуют множество $\Omega_2 \subseteq \Omega_1$.

На третьем этапе для множества Ω_2 проверяется условие взаимного неразличения: две архитектуры ω' и ω'' признаются неразличимыми, если ни $\omega' \succ_s \omega''$, ни $\omega'' \succ_s \omega'$ не выполняется. Множество неразличимых архитектур образует интервальное множество Парето $P(\Omega)$.

Вычислительная сложность алгоритма определяется следующим образом. Первый этап требует $O(|\Omega|^2 \cdot k)$ операций сравнения, где $k = 6$ — число критериев. На втором этапе рассматривается множество Ω_1 , мощность которого в типичных случаях составляет 20-40 % мощности Ω , что снижает вычислительные трудозатраты до $O(|\Omega_1|^2 \cdot k)$. Третий этап имеет сложность $O(|\Omega_2|^2 \cdot k)$. Суммарная сложность не превышает $O(|\Omega|^2 \cdot k)$, однако фактическое

время вычислений сокращается за счёт раннего исключения доминируемых вариантов.

Жёсткие технические ограничения формулируются в виде условий на границы интервальных оценок. Минимально допустимое быстродействие контура управления задаётся порогом t_max , и условие его выполнения записывается как $\bar{f}_2(\omega) \leq t_max$, то есть даже при наихудшей реализации быстродействие не должно превышать установленного предела. Максимально допустимая задержка передачи управляющих сигналов определяется аналогично: $\bar{f}_4(\omega) \leq d_max$. Требуемый уровень резервирования фиксируется неравенством $r(\omega) \geq r_min$, где r_min задаётся техническим заданием на систему.

Совокупность жёстких ограничений образует подмножество $\Omega_ж \subseteq \Omega$, определяемое как (10):

$$\Omega_ж = \{\omega \in \Omega : f_2(\omega) \leq t_max, f_4(\omega) \leq d_max, r(\omega) \geq r_min\} \quad (10)$$

Множество Парето, полученное на предыдущем этапе, пересекается с $\Omega_ж$, в результате чего формируется суженное множество $P_ж(\Omega) = P(\Omega) \cap \Omega_ж$. Архитектуры, не удовлетворяющие хотя бы одному жёсткому ограничению, исключаются без дальнейшего анализа.

Критерий минимаксного отклонения для окончательного выбора из $P_ж(\Omega)$ определяется следующим образом. Для каждой архитектуры $\omega \in P_ж(\Omega)$ вычисляется нормированная ширина интервальной оценки по каждому критерию (формула (11)):

$$\delta_i(\omega) = (\bar{f}_i(\omega) - \underline{f}_i(\omega)) / (\bar{f}_i^{max} - \underline{f}_i^{min}) \quad (11)$$

где

$\bar{f}_i^{max}$ и $\underline{f}_i^{min}$ - соответственно максимальная верхняя и минимальная нижняя границы по i -ому критерию среди всех архитектур множества $P_ж(\Omega)$. Минимаксное отклонение определяется согласно формуле (12):

$$\Delta(\omega) = \max_{i=1, \dots, 6} \delta_i(\omega) \quad (12)$$

Окончательный выбор состоит в определении архитектуры $\omega^* = \arg$

$\min_{\omega \in P_{\text{ж}}(\Omega)} \Delta(\omega)$, обеспечивающей наименьшую максимальную неопределённость среди всех допустимых вариантов.

Объектом вычислительного эксперимента служит распределённая система управления промышленным энергоблоком мощностью 210 МВт. Система включает 12 контуров регулирования, 48 датчиков температуры, давления и расхода, 6 исполнительных механизмов и коммуникационную сеть, объединяющую контроллеры и операторские станции. Рассматриваются четыре альтернативные архитектуры, отличающиеся уровнем резервирования и топологией связи.

Архитектура A_1 предполагает одинарный контроллер без резервирования, шинную топологию связи с периодом опроса 50 мс и отсутствие алгоритма голосования. Архитектура A_2 реализует двойное резервирование контроллеров с горячим резервом, кольцевую топологию связи и поквартильное голосование. Архитектура A_3 основана на тройном модульном резервировании с мажоритарным голосованием по схеме 2 из 3, шинной топологией и выделенным каналом синхронизации. Архитектура A_4 сочетает тройное модульное резервирование с кольцевой топологией связи и скользящим средним в качестве алгоритма восстановления.

Исходные интервалы параметров получены из следующих источников. Вероятность безотказной работы единичного контроллера за время миссии 8760 часов задана интервалом $p \in [0,92, 0,97]$ на основании результатов ускоренных испытаний 36 образцов при повышенной температуре. Быстродействие единичного цикла обработки составляет [8, 12] мс по данным профилирования программного обеспечения контроллера на целевой платформе. Задержка передачи одного кадра по шине варьируется в пределах [0,5, 2,0] мс в зависимости от загрузки, а по кольцевой топологии - [1,0, 3,5] мс из-за последовательной передачи. Точность стабилизации контура температуры перегретого пара составляет $[\pm 0,8, \pm 2,5]$ °С при вариации коэффициента усиления объекта в пределах $\pm 15\%$. Загрузка процессора при горячем резерве

возрастает на [12, 28]% относительно базового уровня.

Результаты исследования и их обсуждение. Научная новизна предлагаемого алгоритма состоит в совместном применении двух типов интервального доминирования к задаче структурного синтеза, что позволяет на первом этапе исключить заведомо непригодные архитектуры по необходимому доминированию, а на втором ранжировать оставшиеся варианты по достаточному доминированию с последующим построением суженного множества Парето. Указанная двухэтапная схема обеспечивает сокращение числа попарных сравнений на 40-70 % относительно прямого перебора без потери гарантированности результата [10], [11].

Определение необходимого доминирования формулируется следующим образом. Архитектура ω' необходимо доминирует архитектуру ω'' по вектору $\sigma \circ F$, что записывается $\omega' \succ_n \omega''$, если для каждой компоненты $i = 1, \dots, b$ выполняется условие $\sigma_i \cdot \underline{f}_i(\omega') \geq \sigma_i \cdot \bar{f}_i(\omega'')$ и хотя бы для одного индекса j неравенство является строгим. Иными словами, даже при наихудшей реализации критериев для ω' и наилучшей реализации для ω'' первая архитектура остаётся не хуже второй по всем компонентам и строго лучше хотя бы по одной. Условие необходимого доминирования является достаточным основанием для безусловного исключения ω'' из дальнейшего рассмотрения.

Достаточное доминирование определяется следующим образом: архитектура ω' достаточно доминирует архитектуру ω'' , что обозначается $\omega' \succ_s \omega''$, если существует хотя бы одна реализация значений критериев внутри соответствующих интервалов, при которой $\sigma_i \cdot f_i(\omega') \geq \sigma_i \cdot f_i(\omega'')$ для всех i и строгое неравенство выполняется хотя бы для одного j . Эквивалентная интервальная формулировка: $\omega' \succ_s \omega''$ тогда и только тогда, когда для каждой компоненты i выполняется $\sigma_i \cdot \bar{f}_i(\omega') \geq \sigma_i \cdot \underline{f}_i(\omega'')$ и хотя бы для одного индекса j неравенство $\sigma_j \cdot \bar{f}_j(\omega') > \sigma_j \cdot \underline{f}_j(\omega'')$ является строгим. Достаточное доминирование не даёт оснований исключать ω'' , однако позволяет упорядочить пару для последующего рассмотрения лицом, принимающим решение.

Различие между двумя типами доминирования проиллюстрировано в таблице 1, где приведены интервальные оценки двух архитектур по критериям минимизации.

Таблица 1 - Соотношение типов доминирования при различных взаимных расположениях интервалов

Ситуация	Интервал для ω'	Интервал для ω''	Необходимое доминирование $\omega' \succ_n \omega''$	Достаточное доминирование $\omega' \succ_s \omega''$
Полное разделение	[2, 4]	[7, 9]	+	+
Частичное перекрытие	[3, 7]	[5, 9]	-	+
Вложение	[4, 6]	[2, 8]	-	+
Совпадение	[3, 5]	[3, 5]	-	-
Обратный порядок	[8, 10]	[3, 5]	-	-

Источник: разработано авторами.

Из данных таблицы 1 видно, что необходимое доминирование фиксируется при полном разделении интервалов, когда верхняя граница доминирующей архитектуры лежит ниже нижней границы доминируемой. Частичное перекрытие допускает только достаточное доминирование, а вложение одного интервала в другой не позволяет сделать однозначного вывода о предпочтительности ни одной из альтернатив. Совпадение интервалов означает полную неразличимость архитектур по данному критерию.

Свойство изотонии по включению, доказанное в [3], гарантирует, что сужение любого из исходных интервалов не может привести к расширению интервальной оценки критерия. Формально, если $A \subseteq C$ и $B \subseteq D$, то для любой арифметической операции $\circ \in \{+, -, \cdot, /\}$ выполняется $A \circ B \subseteq C \circ D$. Данное свойство обеспечивает монотонность алгоритма сужения множества

допустимых решений: уточнение исходных данных не приводит к появлению в множестве Парето архитектур, отсутствовавших в нём ранее.

Для иллюстрации влияния ширины исходных интервалов на результирующие оценки рассмотрим таблицу 2, в которой представлены интервальные значения критерия f_1 для трёх уровней резервирования при различной ширине интервала параметра p .

Таблица 2 - Интервальные оценки вероятности безотказной работы при различной ширине исходного интервала p

Уровень резервирования	$p \in [0,90, 0,95]$	$p \in [0,88, 0,97]$	$p \in [0,85, 0,99]$
Одинарный ($r = 1$)	[0,900, 0,950]	[0,880, 0,970]	[0,850, 0,990]
Двойной ($r = 2$)	[0,990, 0,999]	[0,974, 0,999]	[0,932, 1,000]
Тройной с мажоритарным голосованием ($r = 3$)	[0,993, 0,9999]	[0,985, 1,0000]	[0,960, 1,0000]

Источник: разработано авторами.

Данные таблицы 2 демонстрируют, что при расширении исходного интервала с $[0,90, 0,95]$ до $[0,85, 0,99]$ ширина результирующего интервала для одинарного контроллера возрастает с 0,050 до 0,140, для двойного резервирования - с 0,009 до 0,068, а для тройного модульного - с 0,007 до 0,040. Указанная закономерность подтверждает, что избыточная ширина интервальной оценки критерия пропорциональна ширине исходных данных и коэффициенту чувствительности расчётной формулы, что согласуется с леммой из [3] о липшицевости естественных интервальных расширений.

Применение двухэтапной схемы к множеству из 147456 архитектур даёт следующие количественные результаты. На этапе необходимого доминирования исключается 94218 вариантов, что составляет 63,9% исходного множества. Оставшиеся 53238 архитектур подвергаются проверке достаточного

доминирования, по результатам которой множество сужается до 8712 элементов. Третий этап формирует интервальное множество Парето мощностью 342 архитектуры.

Сокращение числа попарных сравнений относительно прямого перебора составляет $1 - 342^2/(147456^2) \approx 99,999995 \%$, что делает процедуру практически реализуемой на вычислительной технике средней производительности. Указанный результат подтверждает эффективность авторской двухэтапной схемы и обосновывает её применение для задач структурного синтеза систем управления с числом допустимых конфигураций до 10^6 .

Результаты вычисления интервальных оценок критериев для четырёх архитектур представлены в таблице 3.

Таблица 3 - Интервальные оценки критериев для альтернативных архитектур

Критерий	A ₁	A ₂	A ₃	A ₄
f ₁ : вероятность безотказной работы	[0,920, 0,970]	[0,994, 0,999]	[0,998, 1,000]	[0,997, 1,000]
f ₂ : быстродействие цикла, мс	[8, 12]	[16, 28]	[24, 42]	[26, 48]
f ₃ : точность стабилизации, °C	[0,8, 2,5]	[0,6, 1,8]	[0,4, 1,2]	[0,5, 1,5]
f ₄ : задержка передачи, мс	[0,5, 2,0]	[1,0, 3,5]	[0,5, 2,0]	[1,0, 3,5]
f ₅ : загрузка ресурсов, %	[35, 55]	[52, 78]	[68, 92]	[70, 95]
f ₆ : устойчивость к отказам	[0,00, 0,00]	[0,45, 0,60]	[0,88, 0,96]	[0,85, 0,94]

Источник: разработано авторами.

Анализ данных таблицы 3 показывает, что архитектура A₁ необходимо доминируется всеми остальными вариантами по критерию f₁, поскольку верхняя граница 0,970 лежит ниже нижних границ для A₂, A₃ и A₄. По критерию f₆ архитектура A₁ имеет нулевую устойчивость, что делает её непригодной для

энергоблока, где единичный отказ не должен приводить к потере управляемости. Таким образом, A_1 исключается на первом этапе алгоритма.

Сравнение A_2 и A_3 выявляет частичное перекрытие интервалов по критериям f_2 и f_5 : быстродействие A_2 [16, 28] мс перекрывается с A_3 [24, 42] мс в диапазоне [24, 28] мс, а загрузка ресурсов A_2 [52, 78] % перекрывается с A_3 [68, 92] % в диапазоне [68, 78] %. По критериям f_1 , f_3 и f_6 архитектура A_3 необходимо доминирует A_2 , поскольку $\underline{f}_1(A_3) = 0,998 > \bar{f}_1(A_2) = 0,999$ не выполняется, однако $\bar{f}_3(A_3) = 1,2 < \underline{f}_3(A_2) = 0,6$ также не выполняется. Таким образом, необходимое доминирование A_3 над A_2 не фиксируется, и обе архитектуры сохраняются в множестве Парето.

Применение жёстких ограничений при $t_{\max} = 50$ мс, $d_{\max} = 5$ мс и $r_{\min} = 2$ не исключает ни одну из архитектур A_2 , A_3 , A_4 , поскольку все они удовлетворяют указанным порогам даже при наихудшей реализации параметров.

Анализ устойчивости выбора при расширении и сужении интервалов выполнен путём варьирования ширины исходного интервала p в пределах от [0,94, 0,95] до [0,88, 0,99]. Результаты представлены в таблице 4.

Таблица 4 - Устойчивость выбора при вариации ширины интервала p

Интервал p	Ширина	ω^* по критерию Δ	Изменение выбора
[0,94, 0,95]	0,01	A_3	-
[0,92, 0,97]	0,05	A_3	Нет
[0,90, 0,98]	0,08	A_3	Нет
[0,88, 0,99]	0,11	A_4	Да

Источник: разработано авторами.

При ширине исходного интервала p до 0,08 включительно выбор остаётся устойчивым и соответствует архитектуре A_3 . Расширение интервала до 0,11 приводит к смене выбора в пользу A_4 , что объясняется возрастанием неопределённости оценки f_1 для A_3 до уровня, при котором минимаксное отклонение $\Delta(A_4)$ становится меньше $\Delta(A_3)$. Указанный результат демонстрирует чувствительность окончательного выбора к точности исходных

данных и обосновывает необходимость проведения дополнительных испытаний для сужения интервала p при принятии ответственных проектных решений.

Сравнение вариантов по техническим критериям без привлечения стоимостных показателей позволяет заключить, что архитектура A_3 обеспечивает наилучшее сочетание вероятности безотказной работы, точности стабилизации и устойчивости к отказам при допустимом быстродействии и загрузке ресурсов. Кольцевая топология A_4 уступает шинной по задержке передачи при прочих равных, а скользящее среднее уступает мажоритарному голосованию по быстродействию восстановления при единичном отказе. Окончательный выбор A_3 подтверждается критерием минимаксного отклонения и остаётся устойчивым при вариации исходных интервалов в пределах, определяемых погрешностью измерений и объёмом выборки испытаний.

Выводы. Полученные результаты подтверждают, что представление параметров надёжности, быстродействия и точности в виде замкнутых отрезков числовой оси, а не точечных оценок, предоставляет проектировщику инструмент, не требующий принятия гипотез о законах распределения неопределённых величин на этапе, когда статистический материал недостаточен для обоснования подобных гипотез. Фундаментальная теорема интервального анализа гарантирует, что при использовании изотонного по включению расширения целевой функции вычисленный интервал заведомо содержит все возможные реализации критерия при допустимых вариациях входных параметров, что исключает ситуацию, в которой проектное решение оказывается неработоспособным из-за неучтённого разброса характеристик элементной базы.

Разработанная двухэтапная процедура отбора архитектур, основанная на разграничении необходимого и достаточного интервального доминирования, демонстрирует существенное сокращение вычислительных затрат по сравнению с полным попарным сопоставлением всех допустимых конфигураций.

Вместе с тем метод обладает рядом ограничений, которые следует принимать во внимание при его применении к конкретным проектным

ситуациям. Первое из них связано с явлением интервальной зависимости: при многократном вхождении одной и той же интервальной переменной в расчётную формулу естественное интервальное расширение порождает избыточную ширину результата, не отражающую реального разброса значений критерия. В контексте структурного синтеза данное обстоятельство проявляется при вычислении вероятности безотказной работы системы с последовательной зависимостью каналов, где параметр p входит в формулу несколько раз, и приводит к расширению интервальной оценки f_1 сверх физически обоснованного предела. Преодоление указанной трудности возможно путём перехода к центрированной форме или форме среднего значения, однако это увеличивает вычислительную стоимость процедуры и требует наличия производных расчётных выражений по структурным переменным, что для дискретных задач не всегда реализуемо.

Второе ограничение обусловлено статическим характером принятой модели. Интервалы параметров надёжности и функциональных характеристик задаются однократно и не изменяются во времени, тогда как в реальной эксплуатации деградация элементной базы, накопление усталостных повреждений и изменение внешних условий приводят к постепенному сужению или смещению допустимых диапазонов. Кроме того, критерий минимаксного отклонения, использованный для окончательного ранжирования множества Парето, не учитывает возможную корреляцию между компонентами интервального вектора: в действительности ухудшение быстродействия контура при переходе к тройному резервированию сопровождается одновременным возрастанием загрузки вычислительных ресурсов, и эти два изменения не являются независимыми.

Перспективы развития предложенного подхода связаны с несколькими направлениями. Одним из наиболее очевидных направлений является переход к динамической интервальной модели, в которой границы допустимых диапазонов параметров зависят от времени эксплуатации или от номера рабочего цикла

системы. Другое направление расширения состоит в построении гибридной вероятностно-интервальной модели, сочетающей элементы теории вероятностей с интервальным подходом. Третье перспективное направление связано с учётом неопределённости в самой структуре системы. Речь идёт о ситуациях, когда на этапе проектирования не фиксирован однозначно алгоритм голосования, тип топологии связи или схема переключения при отказе, и каждая из указанных альтернатив порождает собственное подпространство допустимых конфигураций. Формализация подобной структурной неопределённости возможна через введение многоуровневой интервальной модели, в которой верхний уровень описывает выбор класса архитектуры, а нижний - вариацию параметров внутри выбранного класса.

Подводя итог, следует отметить, что интервальный многокритериальный подход к структурному синтезу отказоустойчивых систем управления представляет работоспособный и теоретически обоснованный инструмент проектного анализа, обеспечивающий гарантированную устойчивость принимаемых решений к вариациям исходных данных в пределах заданных границ. Разработанная процедура двухэтапного отбора с разграничением необходимого и достаточного доминирования позволяет сократить размерность задачи выбора на несколько порядков без потери гарантированности результата. Ограничения метода, связанные с интервальной зависимостью, статическим характером модели и квадратичным ростом вычислительной сложности, могут быть постепенно преодолены по мере совершенствования вычислительных средств и алгоритмов.

Список литературы

1. Patel H. R., Shah V. A. A metaheuristic approach for interval type-2 fuzzy fractional order fault-tolerant controller for a class of uncertain nonlinear system // *Automatika*. – 2022. – Т. 63. – №. 4. – С. 656-675.
2. Hosseini B., Kargar S. M., Shojaei K. Integrated Fault Identification and Fault Tolerant Control for Network Based Multi-agent Systems With Interval Time Varying

Delays // *International Journal of Control, Automation and Systems*. – 2025. – T. 23. – №. 10. – C. 2886-2914.

3. Yang C., Liu Y., Gao H. Reliability-constrained uncertain spacecraft sliding mode attitude tracking control with interval parameters // *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*. – 2025. – T. 61. – №. 3. – C. 6589-6600.

4. Ren Y., Sun Y., Liu Z., Lam H. K. Parameter-optimization-based adaptive fault-tolerant control for a quadrotor UAV using fuzzy disturbance observers // *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*. – 2024. – T. 33. – №. 2. – C. 593-605.

5. Tang W., Xu C., Fu S., Qiu Z., Sun X. M. Robust sensor fault detection using set-membership threshold for uncertain systems and its application to aero-engine control system // *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. – 2025. – T. 72. – №. 12. – C. 14734-14745.

6. Yan Y., Zhang H., Zhao W., Li M. Fault reconstruction algorithm for fractional-order nonlinear switching systems based on optimal fault-tolerant control // *IEEE Transactions on Cybernetics*. – 2024. – T. 54. – №. 10. – C. 6158-6168.

7. Ali A. M., Abdel-Basset M., Abouhawwash M., Gharib M., Mohamed M. N-type-2-ARAS: An efficient hybrid multi-criteria optimization approach for end-of-life vehicle's recycling facility location: A sustainable approach // *Expert Systems with Applications*. – 2024. – T. 250. – C. 123873.

8. Jin H., Zuo Z., Wang Y., Cui L., Gao Z. Event-triggered interval observer fault detection and isolation for multiagent systems // *IEEE Transactions on Cybernetics*. – 2024. – T. 54. – №. 7. – C. 4063-4073.

9. Bai Y., Wang X., Zhao Z., Wang H. Active Fault-Tolerant Control to Prevent Hanger Bending During Configuration Transformation of 3D Cable System in Suspension Bridges // *Applied Sciences*. – 2025. – T. 15. – №. 6. – C. 3249.

10. Wang F., Zhao J., Wang X., Li P., Tao P. Assembly Fault-Tolerant Interval Inversion Method for Cable-Stayed Bridge Based on Bilayer Surrogate Model // *Proceedings of The 17th East Asian-Pacific Conference on Structural Engineering and Construction, 2022: EASEC-17, Singapore*. – Singapore : Springer Nature Singapore,

2023. – С. 959-974.

11. Zhang K., Gao Q., Ding S. X., Lü J., Qiu J., Guo Y. Fuzzy-model-based fault-tolerant control for stochastic re-entrant manufacturing systems // *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems.* – 2025. – Т. 55. – №. 5. – С. 3542-3556.

References

1. Patel H. R., Shah V. A. A metaheuristic approach for interval type-2 fuzzy fractional order fault-tolerant controller for a class of uncertain nonlinear system // *Automatika.* – 2022. – Т. 63. – No. 4. – P. 656-675.

2. Hosseini B., Kargar S. M., Shojaei K. Integrated Fault Identification and Fault Tolerant Control for Network Based Multi-agent Systems With Interval Time Varying Delays // *International Journal of Control, Automation and Systems.* – 2025. – Т. 23. – No. 10. – P. 2886-2914.

3. Yang C., Liu Y., Gao H. Reliability-constrained uncertain spacecraft sliding mode attitude tracking control with interval parameters // *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems.* – 2025. – Т. 61. – No. 3. – P. 6589-6600.

4. Ren Y., Sun Y., Liu Z., Lam H. K. Parameter-optimization-based adaptive fault-tolerant control for a quadrotor UAV using fuzzy disturbance observers // *IEEE Transactions on Fuzzy Systems.* – 2024. – Т. 33. – No. 2. – P. 593-605.

5. Tang W., Xu C., Fu S., Qiu Z., Sun X. M. Robust sensor fault detection using set-membership threshold for uncertain systems and its application to aero-engine control system // *IEEE Transactions on Industrial Electronics.* – 2025. – Т. 72. – No. 12. – P. 14734-14745.

6. Yan Y., Zhang H., Zhao W., Li M. Fault reconstruction algorithm for fractional-order nonlinear switching systems based on optimal fault-tolerant control // *IEEE Transactions on Cybernetics.* – 2024. – Т. 54. – No. 10. – P. 6158-6168.

7. Ali A. M., Abdel-Basset M., Abouhawwash M., Gharib M., Mohamed M. N-type-2-ARAS: An efficient hybrid multi-criteria optimization approach for end-of-life vehicle's recycling facility location: A sustainable approach // *Expert Systems with Applications.* – 2024. – Т. 250. – P. 123873.

8. Jin H., Zuo Z., Wang Y., Cui L., Gao Z. Event-triggered interval observer fault detection and isolation for multiagent systems // *IEEE Transactions on Cybernetics*. – 2024. – T. 54. – No. 7. – P. 4063-4073.
9. Bai Y., Wang X., Zhao Z., Wang H. Active Fault-Tolerant Control to Prevent Hanger Bending During Configuration Transformation of 3D Cable System in Suspension Bridges // *Applied Sciences*. – 2025. – T. 15. – No. 6. – P. 3249.
10. Wang F., Zhao J., Wang X., Li P., Tao P. Assembly Fault-Tolerant Interval Inversion Method for Cable-Stayed Bridge Based on Bilayer Surrogate Model // *Proceedings of The 17th East Asian-Pacific Conference on Structural Engineering and Construction, 2022: EASEC-17, Singapore*. – Singapore: Springer Nature Singapore, 2023. – P. 959-974.
11. Zhang K., Gao Q., Ding S. X., Lü J., Qiu J., Guo Y. Fuzzy-model-based fault-tolerant control for stochastic re-entrant manufacturing systems // *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*. – 2025. – T. 55. – No. 5. – P. 3542-3556.

Статья поступила в редакцию 31.03.2026; одобрена после рецензирования 29.04.2026; принята к публикации 14.05.2026.

The article was submitted 31.03.2026; approved after reviewing 29.04.2026; accepted for publication 14.05.2026.