ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ
COMPUTER SCIENCE, COMPUTER ENGINEERING AND MANAGEMENT

УДК 004.89
DOI:10.21822/2073-6185-2021-48-4-44-54

Оригинальная статья /Original Paper

Описание метода нечеткого ситуационного управления на основе композиционной гибридной модели сложной технической системы

Д.Ю. Авраменко
Филиал Национального исследовательского университета «МЭИ» в г. Смоленске,
214013, г. Смоленск, Энергетический пр-д, 1, Россия

Резюме. Цель. Целью исследования является обобщение накопленного опыта нечеткого ситуационного управления на основе композиционной гибридной модели сложной технической системы в виде алгоритма и формирование на этой основе рекомендаций по методике формирования и идентификации ситуаций, определяющих параметров и решений для управления сложной технической системой в условиях неполных данных для повышения точности управляющих решений. **Метод.** Исследование основано на моделировании системы в условиях неполноты данных и невозможности получения информации обо всем диапазоне работы системы. Нечеткое ситуационное управление позволяет выработать управляющие решения в соответствии с выбранной стратегией управления и учесть специфику системы благодаря композиционной модели. **Результат.** Предложен алгоритм нечёткого ситуационного управления сложными техническими системами на основе композиционных гибридных моделей. Рассмотрены этапы, особенности, достоинства и недостатки нечёткого ситуационного управления для данного типа систем. Задан порядок определения и однозначной идентификации возникающих нечётких ситуаций для системы, а также рассмотрены методы анализа и выработки типовых стратегий управления. Рассматриваемая в статье композиционная гибридная модель сложной технической системы описывает работу экспериментальной компрессорной установки ЭЦК-55. **Вывод.** К основным достоинствам разработанного нечёткого ситуационного метода управления сложными техническими системами относятся: интеграция системы управления с уже существующими элементами системы; лучшее использование имеющихся ресурсов; адаптивность и надежность метода управления, основанного на нечётких ситуационных сетях и композиционной гибридной модели системы. Определены стратегии управления, позволяющие выполнять требования потребителя по качеству продукта, а также безопасности работы персонала и оборудования, безаварийности производства и экономии ресурсов.

Ключевые слова: нечёткие ситуационные сети, нечёткое ситуационное управление, сложные технические системы, композиционные гибридные модели, нейронные сети, нечёткие сети, компрессорная установка

Для цитирования: Д.Ю. Авраменко. Описание метода нечеткого ситуационного управления на основе композиционной гибридной модели сложной технической системы. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2021; 48(4): 44-54. DOI:10.21822/2073-6185-2021-48-4-44-54

Description of the method of fuzzy situational control based on a composite hybrid model of a complex technical system

D.Yu. Avramenko
Branch of the National Research University Moscow Power Engineering Institute in Smolensk,
214013, Smolensk, Energetichesky pr-d, 1, Russia

Abstract. Objective. The aim of the study is to generalize the accumulated experience of fuzzy situational control based on a compositional hybrid model of a complex technical system in the form

of an algorithm and, on this basis, to form recommendations on the methodology for the formation and identification of situations, determining parameters and solutions for managing a complex technical system under conditions incomplete data to improve the accuracy of control decisions. **Method.** The use of a compositional hybrid model solves the problem of describing and modeling the system in conditions of incomplete data and the impossibility of obtaining information about the entire range of the system's operation. Fuzzy situational control makes it possible to develop control decisions in accordance with the chosen control strategy and take into account the specifics of the system thanks to the compositional model. **Result.** An algorithm for fuzzy situational control of complex technical systems based on compositional hybrid models is proposed. The stages, features, advantages and disadvantages of fuzzy situational control for this type of systems are considered. The procedure for determining and unambiguously identifying emerging fuzzy situations for the system is given, and a method for analyzing and developing typical control strategies is also considered. The compositional hybrid model of a complex technical system considered in the article describes the operation of the experimental compressor unit ETsK-55. **Conclusion.** The main advantages of the developed fuzzy situational method for managing complex technical systems include: integration of the control system with existing elements of the system; better use of available resources; adaptability and reliability of a control method based on fuzzy situational networks and a composite hybrid model of the system. Management strategies have been defined to meet the customer's requirements for product quality, as well as the safety of personnel and equipment, trouble-free production and saving resources.

Key words: fuzzy situational networks, fuzzy situational control, complex technical systems, composite hybrid models, neural networks, fuzzy networks, compressor unit

For citation: D.Yu. Avramenko. Description of the method of fuzzy situational control based on a composite hybrid model of a complex technical system. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2021; 48 (4): 44-54. (In Russ.) DOI:10.21822/2073-6185-2021-48-4-44-54

Введение. Нечёткие ситуационные сети (НСС) представляют собой нечёткие ориентированные взвешенные графы переходов по нечётким эталонным (типовым) ситуациям. Набор и последовательность управляющих решений из текущей целевой ситуации определяются стратегией управления и нечётким маршрутом в этой сети. Для построения НСС используются нечёткие отношения, а также нечёткие модели типа «нечёткая ситуация – стратегия управления – управляющее решение», определяющие степени соответствия управляющих решений нечётким ситуациям и цели управления [1-4]. Нечёткое ситуационное управление (НСУ) СТС позволяет учитывать специфику композиционного моделирования и различных стратегий ситуационного управления, в зависимости от складывающихся условий и предъявляемых требований.

Описанные в работах [5-8, 9-12] особенности позволяют обосновать целесообразность применения для управления СТС нечёткого ситуационного подхода, позволяющего учитывать специфику композиционного моделирования и различных стратегий ситуационного управления в зависимости от складывающихся условий и предъявляемых требований.

Постановка задачи. Целью исследования является обобщение накопленного опыта нечеткого ситуационного управления (НСУ) на основе композиционной гибридной модели сложной технической системы в виде алгоритма и формирование на этой основе рекомендаций по методике формирования и идентификации ситуаций, определяющих параметров и решений для управления СТС в условиях неполных данных для повышения точности управляющих решений.

Методы исследования. В работе обобщены методы и алгоритмы нечеткого ситуационного управления на основе композиционной гибридной модели (КГМ) сложной технической системы (СТС), а также предложены механизмы идентификации текущей ситуации относительно содержащихся в базе типовых нечётких ситуаций и выбора управляющих воздействий, или последовательности таких воздействий в зависимости от выбранных стратегий управления.

Этапы предлагаемого метода нечеткого ситуационного управления сложной технической системой:

1. Сбор данных о сложной технической системе, выделение технических параметров, описывающих систему.

2. Выделение отдельных ситуаций и определяющих их параметров.

3. Представление каждой ситуации в виде ситуаций второго уровня.

4. Формирование управляющих решений для перехода между ситуациями и их весов для различных стратегий управления.

5. Проверка связей между ситуациями, погрешностей и учет всех необходимых параметров.

6. Построение нечёткой ситуационной сети для управления СТС.

7. Определение целевой нечёткой ситуации СТС.

8. Идентификация нечёткой текущей ситуации, характеризующей состояние СТС.

9. Сопоставление идентифицированной нечёткой текущей ситуации со всеми нечёткими ситуациями НСС.

10. Определение и реализация стратегии ситуационного управления (последовательности управляющих решений) по переводу СТС из текущей в целевую нечёткую ситуацию в соответствии с выбранным критерием эффективности управления.

При функционировании СТС этапы 7–10 циклически повторяются (с учетом степени инерционности системы). При изменении состава показателей и диапазонов их изменений осуществляется построение и настройка НСС (этапы 1–6).

Алгоритм нечёткого ситуационного управления СТС. Предлагаемый метод управления основан на анализе текущей ситуации, получаемого при вводе различных входных данных в модель системы управления. Входными данными является множество параметров, описывающих СТС и процессы, происходящие в ней, выходными данными являются управляемые параметры системы [6].

Результаты функционирования системы оцениваются с помощью моделирования в КГМ СТС. Важным фактором является возможность внесения изменений в структуру нечёткой ситуационной модели и КГМ СТС, что позволяет получать актуальные решения о работе системы в связи с динамическим изменением её характеристик.

Для нечёткого ситуационного управления СТС в условиях реального объекта выполняется декомпозиция системы на отдельные подсистемы, описание которых в зависимости от типа и полноты исходных данных распределяется между различными типами моделей. Далее формируются сами ситуации и переходы между ними. Также необходимо учесть, что ситуации и переходы между ними будут иметь различный вес в зависимости от выбранной стратегии управления. В процессе функционирования системы управления могут корректироваться описания ситуаций, изменяться знания об объекте и методах управления им.

К основным задачам нечёткого ситуационного управления СТС относятся следующие: идентификация текущей ситуации системы, её состояния; формирование действий (управляющих решений) и последовательностей действий в зависимости от ситуаций и выбранных стратегий управления; адаптация сложной технической системы к изменениям условий взаимодействия с окружающей средой и изменению самой СТС с учетом целей функционирования системы и стратегий управления.

В ходе исследования выполнен анализ методов решения этих задач нечёткого ситуационного управления СТС, основанных на композиционном гибридном моделировании системы и построении стратегий управления.

Алгоритм нечёткого ситуационного управления СТС представлен на рис.1.

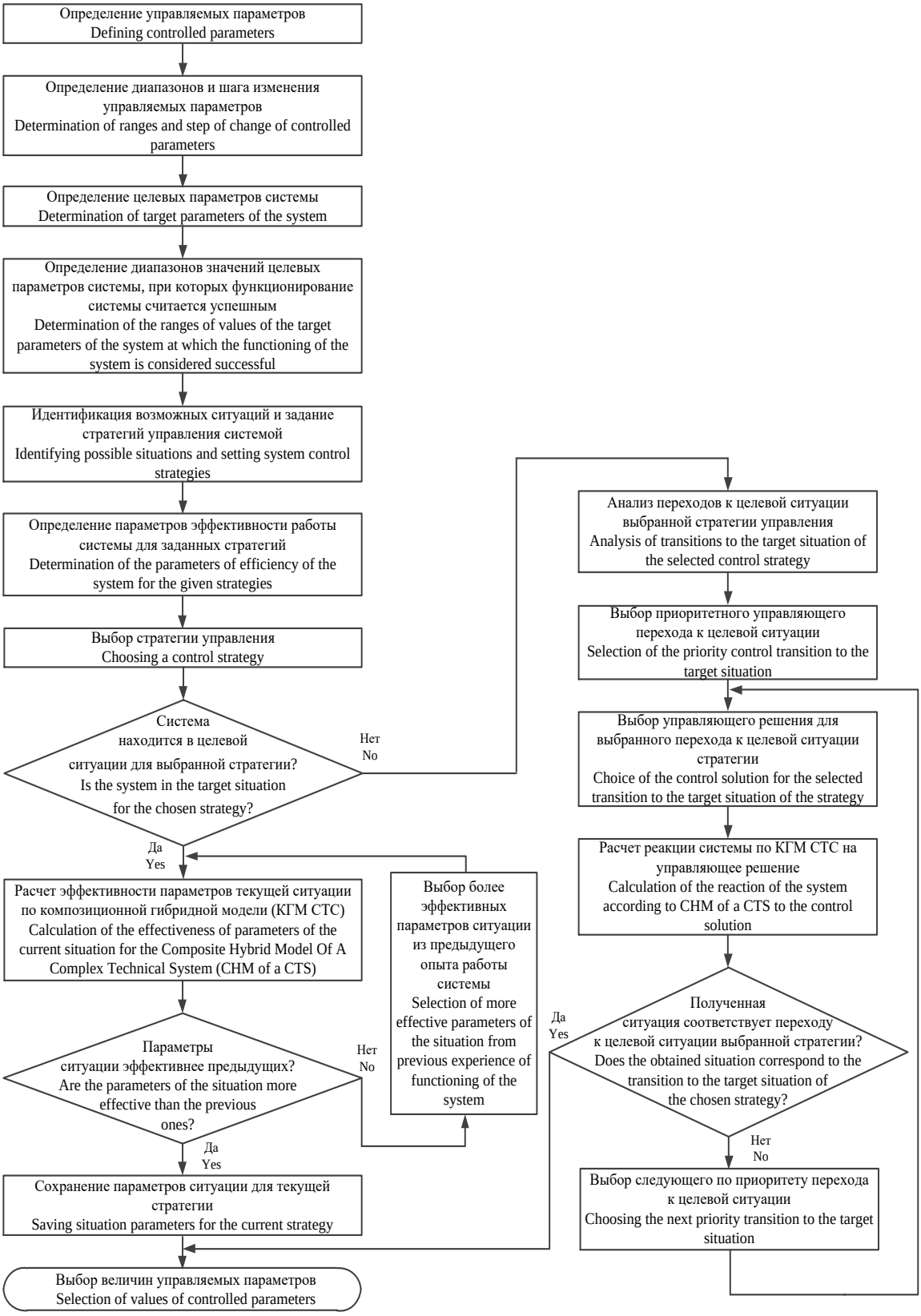

Рис. 1. Алгоритм нечёткого ситуационного управления сложными техническими системами
Fig. 1. Algorithm of fuzzy situational management of complex technical systems

Для обеспечения качества функционирования и эффективного управления системой необходимо выделить из всего списка параметров, описывающих СТС, целевые параметры. Это параметры, с помощью которых оценивают качество работы системы и достижение требуемых значений для продукта. Для управляемых параметров эти диапазоны определяют границы

изменений при поиске оптимальных ситуаций и режимов работы СТС [7]. От изменения значений управляемых параметров зависит, в каком состоянии будет находиться система, каков будет её режим работы и будет ли способна система выполнять свои функции.

Задание и изменение управляемых параметров осуществляется с шагом, который позволяют обеспечить регулирующие органы, задающие эти параметры (например, клапаны, вентили, контакты) и КИПы. Для реализации метода нечёткого ситуационного управления необходимо определить минимальное возможное значение шага изменения для каждого из управляемых параметров [8]. Также необходимо знать и учитывать зоны нечувствительности (дифференциал) прибора.

На управление и анализ работы системы также влияют чувствительные элементы (датчики). Анализ состояния системы производится по показаниям КИП и от их точности, частоты поверки и правильности установки зависят сигналы, поступающие в систему управления и на регулирующие органы.

Идентификация возможных ситуаций и задание стратегий управления системой. Для анализа и идентификации возможных ситуаций необходимо:

- определить целевые и управляемые параметры;
- задать диапазоны изменения значений всех параметров СТС;
- описать и оценить в оговоренных диапазонах нежелательные опасные ситуации и их возможные последствия, а также оптимальные диапазоны параметров для работы;
- учесть меры и управляющие воздействия, смягчающие негативные последствия опасных ситуаций: немедленные и проявляющиеся с течением времени, а также распространяющиеся на соседнее оборудование;
- учесть меры и управляющие воздействия, позволяющие предотвратить опасные ситуации;
- задать терм-множество для каждого параметра;
- выделить значащие целевые параметры, которые однозначно описывают ситуации, возникающие при работе системы;
- при помощи экспертов сформировать все возможные комбинации термов параметров для наиболее частых ситуаций при работе системы, для опасных ситуаций, переходных процессов, разных уровней нагрузки на СТС, ситуаций пуска и остановки оборудования, режимов работы при осуществлении ремонта и замены оборудования;
- для сформированных ситуаций определить возможные переходы между ними и управляющие решения для осуществления этих переходов;
- для каждого перехода присвоить коэффициенты в соответствии с выбранными стратегиями управления.

Целевые параметры — это параметры, показывающие качество работы системы и ее эффективность, достижение требуемых характеристик продукта и задач функционирования СТС.

Для СТС можно выбрать одну оптимальную стратегию, но учитывая изменяющиеся условия работы лучше сформировать несколько стратегий в зависимости от особенностей конкретной системы.

Например, центробежный компрессор является опасным оборудованием и в случае перехода в режим помпажа может произойти взрыв и разлетание частей центробежной машины с большой скоростью, что влечет за собой человеческие жертвы и вывод из строя техники без возможности её восстановления. Стратегия безопасности поможет избежать возникновения опасных ситуаций, но для обеспечения качества продукта или экономии на производстве необходимо учитывать еще и другие стратегии, а также и их комбинации.

В процессе формирования возможных комбинаций параметров, задающих ситуации, происходит полный перебор сочетаний термов этих параметров в заданных диапазонах. Значения параметров системы и окружающей среды поступают в систему управления и происходит

идентификация текущей ситуации в соответствии с ситуациями, которые были сформированы с помощью экспертов.

Также текущая ситуация подвергается анализу, проверяется на оптимальность для выбранной стратегии и происходит расчет и поиск более эффективных параметров работы системы для выбранной ситуации в соответствии с целевыми критериями. Итоговое значение показателя эффективности сравнивается с полученными ранее значениями и, в случае если текущий режим функционирования эффективнее предыдущих, сохраняется.

Когда все сочетания вариантов термов параметров проверены, получаем итоговые варианты сформированных ситуаций и формируем их взаимосвязи, возможности переходов и соответствующие управляющие решения.

Для сохранения стабильности системы рекомендуется из предложенных моделью вариантов выбрать такой, при котором изменения управляемых параметров были бы минимальны.

Задачи, решаемые нечёткой ситуационной моделью управления сложной технической системой. Комбинирование модулей КГМ СТС позволяет создать достаточно точную нечёткую ситуационную систему управления в условиях неполной и разрозненной информации о сложной системе.

Нечёткая ситуационная система управления на основе КГМ позволяет решать несколько основных задач и подзадач:

Контроль (приоритетная задача): осуществление постоянного мониторинга работы системы в фоновом режиме, путем сбора и расчета данных, поступающих с датчиков, КИП и приборов; постоянство анализа динамики изменения параметров в сторону критических значений и прогнозирование возможных аварийных ситуаций на основе анализа работы системы; оповещение персонала и выработка рекомендаций по регулированию в случае нештатных ситуаций; включение средств управления и контроля, прекращающих и предотвращающих развитие аварийных ситуаций; обеспечение высокого уровня безопасности технологического процесса.

Управление: контроль и выработка рекомендаций по управлению производственными процессами, а также поддержание их качества на регламентированном уровне; постоянство анализа динамики изменения параметров в сторону критических значений и прогнозирование возможных аварийных ситуаций; уменьшение амплитуды колебаний рабочих параметров; поддержание режима работы близкого к оптимальному, с учетом безопасности, качества и экономичности процессов; обеспечение высокого уровня безопасности технологического процесса; повышение ресурса оборудования за счет уменьшения числа остановов и пусков, учета нагрузок и износа, точной диагностики и своевременного ремонта.

Проектирование: поиск оптимальных конструкций и режимов работы оборудования с учетом заданных пользователем характеристик; помощь проектировщикам при проведении расчетных исследований – сужение зоны поиска оптимальных конструкций и уменьшение объема расчетов.

Моделирование: расчет характеристик в промежуточных областях, не охваченных экспериментальными испытаниями; поиск оптимальных режимов работы и конструкций оборудования; оценка реакции системы на изменение параметров по модели до воздействия на саму систему; экономия средств на испытаниях натурных моделей; расчет характеристик для подбора оборудования, с возможностью фиксации части параметров СТС.

Обучение персонала: отработка алгоритма действий персонала в случае нештатных и аварийных ситуаций; знакомство нового персонала с технологическими процессами в системе и спецификой её работы; более точная диагностика системы позволяет персоналу запоминать ключевые ситуации и способы их устранения; обучение персонала управлению и регулированию сложной системы; сокращение времени обучения персонала; экономия средств на испытаниях натурных моделей; увеличение ресурса оборудования, его ремонтопригодности; сокращение ошибок при работе персонала с СТС.

Достоинства нечёткого ситуационного управления СТС на основе композиционной гибридной модели:

Интеграция. Для создания системы управления исходят из уже имеющейся системы регулирования рабочих процессов и управления на нижнем уровне (например, аварийная защита оборудования), добавляя к ней управление более высокого уровня и осуществляя тем самым интеграцию всего управления системой.

Лучшее использование имеющихся ресурсов. При изменении текущей ситуации система управления стремится вернуть систему к оптимальному режиму работы, там самым уменьшая затраты на единицу выработки (например, при максимальном КПД компрессора на выработку сжатого газа с заданными характеристиками затрачивается меньше электрической энергии). За счет декомпозиции модели СТС вычислительные мощности системы управления не перегружаются. Нечёткий ситуационный подход также позволяет снять излишнюю нагрузку с оператора за счет предварительного анализа текущей ситуации и облегчает диагностику оборудования для обслуживающего персонала.

Преодоление ограниченных возможностей элементов системы. Иногда задача, подлежащая выполнению, такова, что её нельзя решить применением ни одного из имеющихся управляющих воздействий, например, ограничения в работе конкретного элемента. Однако нечёткий ситуационный подход за счет возможности управляющего перехода, составленного из нескольких управляющих решений, позволяет привести систему в нужное состояние с учетом предпочтительной стратегии управления. Глобальная задача перехода из текущей ситуации в оптимальную образует последовательность переходов и управляющих решений.

Стратификация. Модели СТС можно получить на основе стратификации с учетом физических подсистем, управленческих и экономических аспектов и т. п. А задачи, являющиеся целью функционирования системы, могут быть конкретизированы путем установления последовательностей необходимых подзадач (управляющих решений).

Адаптивность и надежность. Декомпозиция модели СТС позволяет локализовать изменения в процедурах управления и их последствий и обеспечить надежность работы, снизить затраты времени на принятие решений в нестандартных ситуациях, а также локализовать неисправности системы за счет анализа расхождений между показаниями КИПов системы и результатами, рассчитанными моделью.

Композиционную модель адаптируют к изменениям в структуре СТС, замене оборудования и изменению её параметров. Дообучение и замена блоков модели позволяют максимально точно описывать характеристики СТС. Причем при появлении расхождений изменяется не вся модель, а только отдельные части.

Нечёткий ситуационный подход позволяет по мере накопления знаний о работе СТС доопределять новые ситуации или объединять в классы схожие ситуации. Достоинством данного метода является его высокая адаптивность, которая обеспечивается нечётким ситуационным подходом и композиционной гибридной моделью СТС.

Однако, не смотря на перечисленные достоинства, существует ряд факторов, ограничивающих применение нечётких ситуационных сетей и основанных на них методов для моделирования сложных технических систем, а именно: сложность создания нечётких ситуационных сетей и анализа информации о системе; сложность внесения изменений в НСС при добавлении или исключении ситуаций и управляющих решений, а также сложность генерации дополнительных ситуаций при условии недостижимости целевой ситуации; недостаточные возможности для учета взаимозависимости нечётких ситуационных признаков, что может приводить к некорректному анализу влияния управляющих решений; сложность совместного учета различных типов взаимодействия при моделировании системы, большая работа по проверке адекватности НСС реальной системе.

Указанные факторы позволяют обосновать целесообразность разработки нечётких ситуационных моделей и основанных на них методов управления сложными техническими системами. Для учета и проверки взаимозависимости параметров в модель управления системы

включена композиционная гибридная модель, учитывающая влияние управляющих решений на систему до внесения изменений в функционирование СТС. Сложность создания и внесения изменений в НСС сопоставима по сложности с созданием системы управления и моделей СТС другими способами.

Обсуждение результатов. Эффективность использования предложенного метода нечёткого ситуационного управления центробежными компрессорами оценивалась с помощью экспериментального стенда ЭЦК-55 (экспериментальный центробежный компрессор, мощность электропривода 55 кВт).

По результатам проведенных исследований в качестве признаков для нечёткого ситуационного управления рассматриваемым центробежным компрессором выделены следующие: p_1 – давление сжатого газа после компрессора; p_2 – температура сжатого газа после компрессора; p_3 – расход сжатого газа; p_4–p_6 – температура, давление и влажность газа после охладителей и осушителей перед выдачей потребителю, соответственно.

Для иллюстрации нечёткого ситуационного управления компрессорной установкой представлен фрагмент построенной НСУС (рис.2).

Рассмотрено 38 различных вариантов геометрии проточной части стенда (СПЧ), испытания проводились при нескольких значениях числа Маха (M_u). Всего произведены замеры 75 экспериментов, каждый включает 5-6 измерений при различных значениях условного коэффициента расхода Ф [5, 9 -12].

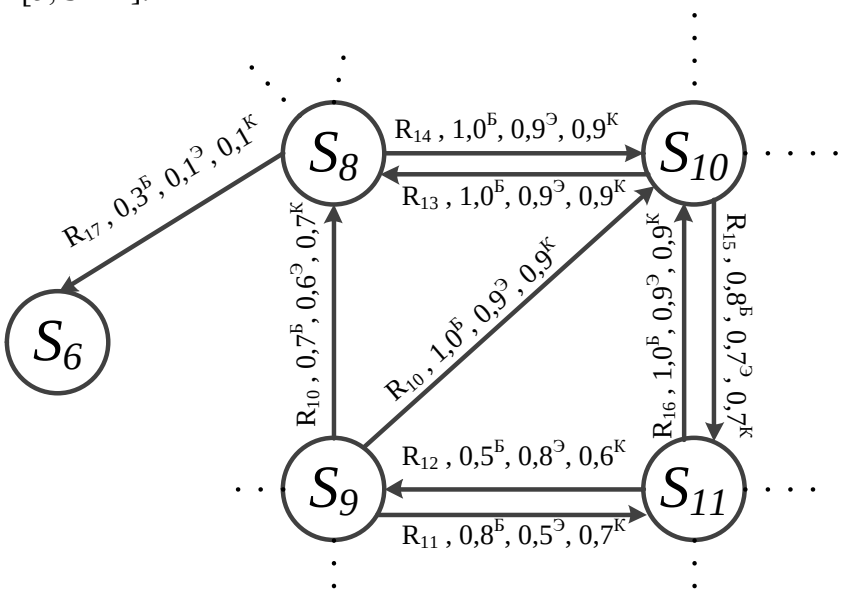

Рис. 2. Фрагмент нечёткой ситуационной управляющей сети для управления компрессорной установкой
Fig. 2. Fragment of a fuzzy situational control network for controlling a compressor unit

Целевыми параметрами являлись характеристики коэффициента напора ψ и КПД η, рис. 3 (рассматривается одно значение по Ф).

На рис. 3 использованы следующие обозначения: *Опер-р* – экспериментальные данные (управление осуществлялось оператором без использования предложенного метода), учитывались следующие стратегии нечёткого ситуационного управления: *В* – «Безопасность», *Е* – «Экономия», *К* – «Качество», *В_К* – «Безопасность – Качество», *В_Е* – «Безопасность – Экономия». Данные с учетом стратегий, получены в результате использования метода нечёткого ситуационного управления.

Гистограммы (рис. 3) иллюстрируют результаты применения описанных выше стратегий нечёткого ситуационного управления компрессорной установкой.

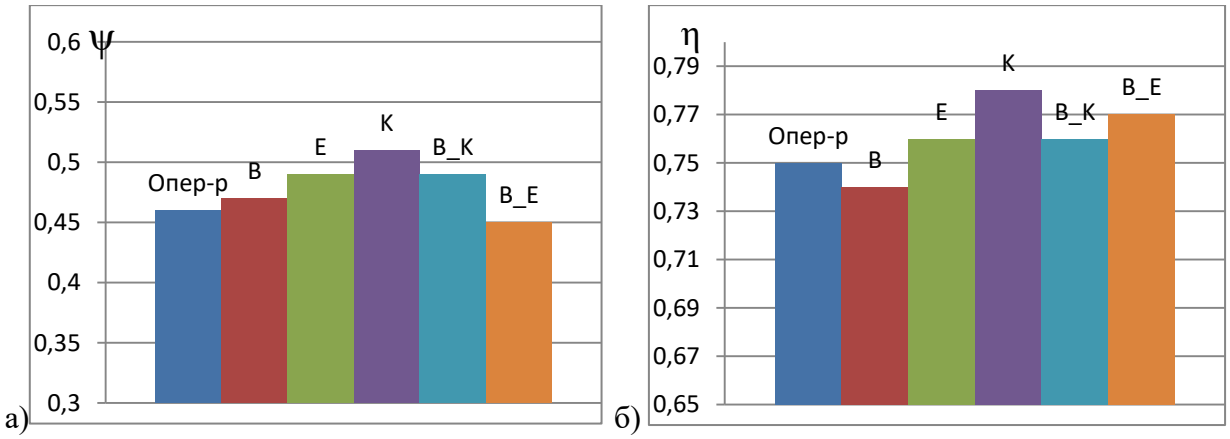

Рис. 3. Результат применения стратегий управления системой
Fig. 3. The result of applying system control strategies

Средняя относительная погрешность по всем проведенным испытаниям при нечётком ситуационном управлении составила 3,5% для значений КПД и 2,8 % для коэффициента напора.

Разработанная нечёткая ситуационная система управления компрессорной установкой на основе композиционных гибридных моделей используется при проведении испытаний модельных ступеней центробежных компрессоров на экспериментальном стенде ЭЦК-55.

Результаты оценки эффективности использования предложенного метода нечёткого ситуационного управления, проведенной с использованием стенда ЭЦК-55 для испытания модельных ступеней, подтверждают целесообразность использования данного метода для СТС рассматриваемого класса.

Приведенные результаты нечеткого ситуационного управления на основе композиционной гибридной модели сложной технической системы наглядно показывают преимущества данного метода перед обычным управлением СТС. Это согласуется с результатами, полученными зарубежными коллегами о нечетком ситуационном управлении и гибридном моделировании в различных научных областях – энергетические системы, водный транспорт, процессы в финансах и химической промышленности [13-21].

Однако именно применение нечётких ситуационных сетей в совокупности с КГМ позволяет осуществлять оптимальное управление с учетом выбранных стратегий, а также максимально точно описывать СТС и анализировать влияние управляющих решений на её работу.

Вывод. Разработан нечёткий ситуационный метод управления сложными техническими системами, к основным достоинствам которого относятся: интеграция системы управления с уже существующими элементами системы, лучшее использование имеющихся ресурсов, а также адаптивность и надежность метода управления, основанного на нечётких ситуационных сетях и композиционной гибридной модели системы.

Выделены стратегии управления, позволяющие выполнять требования потребителя по качеству продукта, а также безопасности работы персонала и оборудования, безаварийности производства и экономии ресурсов.

Такая система управления позволяет решать несколько основных задач: контроля и управления СТС, проектирования, моделирования и обучения персонала.

Библиографический список:

1. Мелихов А.Н., Берштейн Л.С, Коровин С.Я. Ситуационные советующие системы с нечёткой логикой. М.: Наука, 1990. 272 с.
2. Поспелов Д.А. Большие системы. Ситуационное управление. М.: Знание, 1975. 64 с.
3. McCarthy J. Actions and other events in situation calculus // In Proc. of Proceedings of the Eighth International Conference on Principles of Knowledge Representation and Reasoning (KR-2002), 2002. pp. 615-628.
4. Ситчихин А.Н. Иерархические ситуационные модели с предысторией для автоматизированной поддержки решений в сложных системах. Автореферат дисс. канд. техн. наук.: Уфа, 2002. 20 с.

5. Борисов В. В., Авраменко Д. Ю. Нечеткое ситуационное управление сложными системами на основе их композиционного гибридного моделирования //Системы управления, связи и безопасности. 2021. № 3. С. 207-237. DOI: 10.24412/2410-9916-2021-3-207-237.
6. Majors M. Stori J. Cho D. -I. Neural network control of automatic terns // IEEE Control Systems. 1994. V. 14. N 3. pp. 31-36.
7. Макаров И.М. Теория выбора и принятия решений. Наука, 1987. 350с.
8. Ларичев О.И. Теория и методы принятия решений. М.: Логос. 2002.
9. Никифоров А.Г., Авраменко Д.Ю. Подготовка экспериментальных данных для нейросетевого моделирования характеристик центробежных компрессоров // Научно-технические ведомости, СПбПУ. Естественные и инженерные науки. 2018. Т. 24. № 4. С. 61-71. DOI: 10.18721/JEST.240406.
10. Попова Д.Ю. , Борисов В.В. Элементы и режимы работы композиционной модели сложной технической системы // XVI Всероссийская науч.конф. «Нейрокомпьютеры и их применение». Тезисы докладов. М.: МГППУ, 2018. 13 марта 2018 г. С. 191- 194.
11. D. Popova. Neuro-Fuzzy Modeling of Compressor Unit Performance//3 Russian-Pacific Conference on Computer Technology and Applications RPC 2018 (Третья Российско-Тихоокеанская конференция по компьютерным технологиям и приложениям). Владивосток. 18-25 августа 2018. DOI: 10.1109/RPC. 2018. 8482214
12. D. Avramenko, A. Nikiforov, A. Kuchumov, S. Terentev, Yu. Galerkin, O. Solovyeva. Vaneless diffusers characteristics simulating by means of neural networks // 11th International Conference on “Compressors and their Systems”. – London. September 9-11, 2019. DOI:10.1088/1757-899X/604/1/012046.
13. Bei Sun, Chunhua Yang, Yalin Wang, Weihua Gui, Ian Craig, Laurentz Olivier. A comprehensive hybrid first principles/machine learning modeling framework for complex industrial processes. *Journal of Process Control.* V. 86, February 2020, P. 30-43. DOI:10.1016/j.jprocont.2019.11.012.
14. Andrew A.Evstifeev, Margarita A.Zaeva. Method of Applying Fuzzy Situational Network to Assess the Risk of the Industrial Equipment Failure //*Procedia Computer Science*. V. 190, 2021, P. 241-245. DOI: 10.1016/j.procs.2021.06.030.
15. Anatolii Kargin, Sergej Panchenko, AleksejsVasiljevs, TetyanaPetrenko. Implementation of cognitive perception functions in fuzzy situational control model. *Procedia Computer Science.* 2019; 149: 231-238. DOI: 10.1016/j.procs.2019.01.128.
16. Pavel Yu. Buchatskiy; Vladimir S. Simankov; Andrey V. Shopin. Approach to Managing an Autonomous Energy Complex with Renewable Energy Sources based on Fuzzy Models. 2019 International Russian Automation Conference. September 2019. DOI: 10.1109/RUSAUTOCON.2019.8867728
17. Annamária R. Várkonyi-Kóczy; Imre J. Rudas. TS fuzzy modeling based anytime control methodology for situational control // 2011 IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference. Hangzhou, China – May 10-12, 2011. DOI: 10.1109/IMTC.2011.5944354
18. Pegah Amini, Mehdi Khashei. A soft intelligent allocation-based hybrid model for uncertain complex time series forecasting // Applied Soft Computing, V. 84, November 2019, 105736. DOI: 0.1016/j.asoc.2019.105736.
19. Ruxin Gao, Yahui Zhang, David Kennedy. Application of the dynamic condensation approach to the hybrid FE-SEA model of mid-frequency vibration in complex built-up systems // Computers & Structures, V. 228, February 2020, 106156. DOI: 10.1016/j.compstruc.2019;106156.
20. Sultan Alqahtani, Tarek Echekki. A data-based hybrid model for complex fuel chemistry acceleration at high temperatures // Combustion and Flame, V. 223, January 2021, P. 142-152. DOI: 10.1016/j.combustflame.2020.09.022.
21. Slimane Ouhmad, Abderrahim Beni-Hssane, Abdelmajid Hajami. The hybrid neural model to strengthen the e-nose restricted in real complex conditions.*Procedia Computer Science*, 2018; 107-113. DOI: 10.1016/j.procs.2018.07.150.

References:

1. Melikhov A.N., Bershtein L.S., Korovin S.Ya. Situational advising systems with fuzzy logic. [Nauka]. *Science.* 1990; 272 (In Russ)
2. Pospelov D.A. Large systems. Situational management. [Znaniye] *Knowledge.* 1975; 64. (In Russ)
3. McCarthy J. Actions and other events in situation calculus // In Proc. of Proceedings of the Eighth International Conference on Principles of Knowledge Representation and Reasoning (KR-2002), 2002; 615-628.
4. Sitchikhin A.N. Historical hierarchical situational models for automated decision support in complex systems. Abstract dissertation. PHD .: Ufa, 2002; 20. (In Russ)
5. Borisov V. V., Avramenko D. Yu. Fuzzy situational control of complex systems based on their compositional hybrid modeling . [Sistemy upravleniya, svyazi i bezopasnosti] *Control Systems, Communications and Security*. 2021; 3: 207-237. DOI: 10.24412/2410-9916-2021-3-207-237. (In Russ)
6. Majors M. Stori J. Cho D. -I. Neural network control of automatic terns. IEEE Control Systems. 1994; 14(3): 31-36.
7. Makarov I.M. The theory of choice and decision making. Nauka]. *Science.* 1987; 350. (In Russ)
8. Larichev O.I. Theory and methods of decision making. *Logos.* 2002. (In Russ)
9. Nikiforov A.G., Avramenko D.Yu. Preparation of experimental data for neural network modeling of characteristics of centrifugal compressors. [Nauchno-tekhnicheskiye vedomosti, SPbPU. Yestestvennyye i inzhenernyye nauki] *Scientific and technical statements, St. Petersburg State Polytechnical University Journal. Natural and engineering sciences.* 2018; 24(4): 61-71. DOI: 10.18721/JEST.240406. (In Russ)
10. Popova D.Yu. , Borisov V.V. Elements and modes of operation of a compositional model of a complex technical system. XVI All-Russian Scientific Conference. "Neurocomputers and their application". Abstracts of reports. MGPPU, 2018.13 March 2018; 191-194. (In Russ)
11. Popova D. Neuro-Fuzzy Modeling of Compressor Unit Performance. 3rd Russian-Pacific Conference on Computer Technology and Applications RPC 2018. DOI: 10.1109/RPC.2018.8482214

12. Avramenko D., Nikiforov A., Kuchumov A., Terentev S., Galerkin Yu., Solovyeva O. Vaneless diffusers characteristics simulating by means of neural networks . 11th International Conference on "Compressors and their Systems". London. September 9-11, 2019. DOI:10.1088/1757-899X/604/1/012046.
13. Bei Sun, Chunhua Yang, Yalin Wang, Weihua Gui, Ian Craig, Laurentz Olivier. A comprehensive hybrid first principles/machine learning modeling framework for complex industrial processes. *Journal of Process Control.* February 2020; 86: 30-43. DOI:10.1016/j.jprocont.2019.11.012.
14. Andrew A.Evstifeev, Margarita A.Zaeva. Method of Applying Fuzzy Situational Network to Assess the Risk of the Industrial Equipment Failure. *Procedia Computer Science*. 2021; 190: 241-245. DOI: 10.1016/j.procs.2021.06.030.
15. Anatolii Kargin, Sergej Panchenko, AleksejsVasiljevs, TetyanaPetrenko. Implementation of cognitive perception functions in fuzzy situational control model. *Procedia Computer Science.* 2019; 149: 231-238. DOI: 10.1016/j.procs.2019.01.128.
16. Pavel Yu. Buchatskiy; Vladimir S. Simankov; Andrey V. Shopin. Approach to Managing an Autonomous Energy Complex with Renewable Energy Sources based on Fuzzy Models. 2019 International Russian Automation Conference. September 2019. DOI: 10.1109/RUSAUTOCON.2019.8867728
17. Annamária R. Várkonyi-Kóczy; Imre J. Rudas. TS fuzzy modeling based anytime control methodology for situational control. 2011 IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference. Hangzhou, China – May 10-12, 2011. DOI: 10.1109/IMTC.2011.5944354
18. Pegah Amini, Mehdi Khashei. A soft intelligent allocation-based hybrid model for uncertain complex time series forecasting. *Applied Soft Computing*. November 2019; 84: 105736. DOI: 0.1016/j.asoc.2019.105736.
19. Ruxin Gao, Yahui Zhang, David Kennedy. Application of the dynamic condensation approach to the hybrid FE-SEA model of mid-frequency vibration in complex built-up systems. *Computers & Structures.* V. 228, February 2020, 106156. DOI: 10.1016/j.compstruc. 2019;106156.
20. Sultan Alqahtani, Tarek Echekki. A data-based hybrid model for complex fuel chemistry acceleration at high temperatures. *Combustion and Flame*, V. 223, January 2021; 142-152. DOI: 10.1016/j.combustflame.2020.09.022.
21. Slimane Ouhmad, Abderrahim Beni-Hssane, Abdelmajid Hajami. The hybrid neural model to strengthen the e-nose restricted in real complex conditions. *Procedia Computer Science*. 2018; 107-113. DOI: 10.1016/j.procs.2018.07.150.

Сведения об авторе:

Авраменко Дарья Юрьевна, аспирант, кафедра управления и интеллектуальных технологий; Leyzi-small@yandex.ru; ORCID 0000-0002-0363-4389

Information about the authors:

Daria Yu. Avramenko, Postgraduate Student, Department of Management and Intelligent Technologies; Leyzi-small@yandex.ru; ORCID 0000-0002-0363-4389

Конфликт интересов / Conflict of interest.

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов/The author declare no conflict of interest.

Поступила в редакцию/ Received 15.10.2021.

Одобрена после рецензирования / Reviced 20.11.2021.

Принята в печать /Accepted for publication 20.11.2021.