

УДК 004.732.629.5-52

В.В. Вычужанин, С.Н. Коновалов

#### ГИБРИДНЫЕ ЭКСПЕРТНЫЕ СИСТЕМЫ ДЛЯ ПРОТИВОАВАРИЙНОГО УПРАВЛЕНИЯ СЛОЖНЫМИ ТЕХНИЧЕСКИМИ ОБЪЕКТАМИ

*В статье приведены результаты анализа методов противоаварийного управления сложными техническими системами, основанных на использовании экспертных и гибридных экспертных систем для оценки технического состояния судовых сложных систем. Рассмотрены структурные схемы построения систем противоаварийного управления на основе гибридных экспертных систем. Рекомендуется совершенствование методов диагностики и прогнозирования технического состояния сложных технических систем, базирующихся на основе гибридных экспертных систем.*

**Ключевые слова:** судовые сложные технические системы, диагностика, прогнозирование, техническое состояние, противоаварийное управление, гибридные экспертные системы.

*The article presents the results of analysis of methods for emergency control of complex technical systems based on the use of expert and hybrid expert systems for assessing the technical condition of ship complex systems. Structural diagrams of construction of emergency control systems based on hybrid expert systems are considered. It is recommended to improve the methods for diagnosing and forecasting the technical state of complex technical systems based on hybrid expert systems.*

**Keywords:** ship complex technical systems, diagnostics, forecasting, technical condition, emergency control, hybrid expert systems.

**Введение.** Специфика функционирования судов связана с эксплуатацией десятков разнообразных сложных технических систем (СТС), а также многообразием используемого программного обеспечения для построения информационных систем мониторинга, диагностики и прогнозирования технического состояния систем [1-3].

Надежность судовых СТС зависит: от когнитивного фактора; переменной структуры систем в зависимости от режимов работы; изменчивости во времени элементов систем.

Типичным примером судовой СТС с переменной структурой, изменяющейся в зависимости от режимов работы, являются системы комфортного кондиционирования воздуха [4; 5]. Надежность работы подобных систем влияет на работоспособность членов экипажей, а значит на живучесть судна.

---

© Вычужанин В.В., Коновалов С.Н., 2017

Повысить надежность судовых СТС возможно применением средств противоаварийного управления системами [6-8]. Противоаварийное управление СТС может выполняться по этапам. На каждом этапе используются определенные средства управления для прекращения или ослабления развития аварий и обеспечения перехода к установившемуся режиму. Устройства управления, используемые на каждом этапе, резервируют устройства предыдущего этапа в случае их отказа, неэффективности управляющих воздействий или при возникновении непредусмотренной аварийной ситуации. Центральная задача при проектировании системы противоаварийной управления СТС состоит в выборе состава и числа средств контроля для обнаружения и ликвидации развития аварийных ситуаций. Решение задач противоаварийного управления СТС требует предварительного решения промежуточных задач, связанных с мониторингом, диагностикой и прогнозированием технического состояния СТС на основе использования систем искусственного интеллекта. К системам искусственного интеллекта можно отнести [9-11]: экспертные системы (ЭС); нечеткие системы; системы поддержки принятия решений; искусственные нейронные сети; генетические алгоритмы.

**Актуальность.** Интеллектуализация процессов обработки диагностической информации с использованием технологии ЭС, способных обеспечить повышение качества оценок технического состояния и противоаварийного управления СТС, является одним из направлений, определяющих повышение надежности таких систем.

Реализация требований по обеспечению надежности функционирования судовых СТС часто основывается на использовании систем противоаварийного управления на базе экспертных систем оценок технического состояния сложных систем. Анализ методов противоаварийного управления СТС, основанных на использовании экспертных систем для оценок и прогнозирования технического состояния судовых сложных систем является актуальной задачей.

**Целью работы** является анализ методов противоаварийного управления СТС, основанных на использовании экспертных систем для оценок и прогнозирования технического состояния судовых сложных систем.

**Изложение основного материала.** ЭС являются нераздельной частью структуры противоаварийного управления СТС, образуя искусственную интеллектуальную систему [12-16]. Упрощенная структурная схема ЭС оценок технического состояния и принятия решений о дальнейшей эксплуатации оборудования СТС показана на рис. 1 [17]. На рис. 2 приведена схема совместной эксплуатации СТС с ЭС (1 – процесс преобразования энергии в СТС; 2 – управляющая система параметрами СТС; 3 – мониторинговая система параметров СТС; 4 – информационно-менеджментная система; 5 – человеко-машинный интерфейс; 6,7 – ЭС).

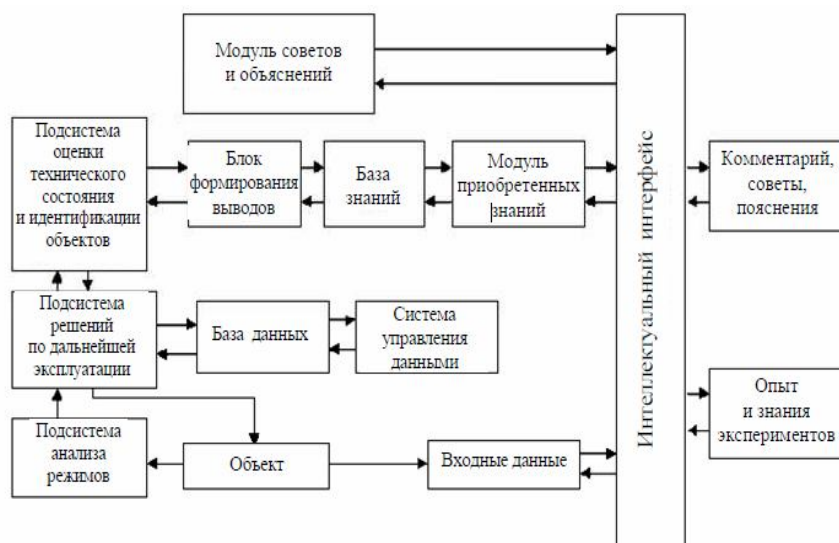


Рис. 1. Упрощенная структурная система ЭС

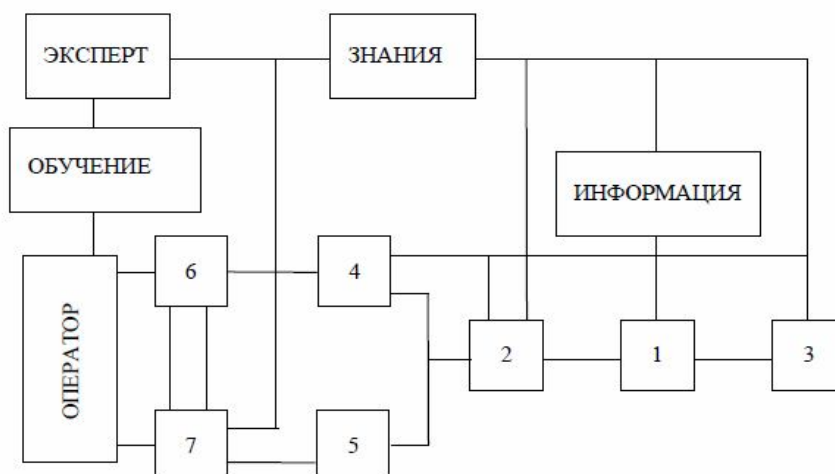


Рис. 2. Схема эксплуатации СТС с ЭС

К функциям ЭС в системах противоаварийного управления СТС можно отнести: интерпретацию данных для определения их значения; диагностику или определение состояния систем на основе интерпретации данных мониторинга; прогнозирование развития будущего на основе моделирования настоящего технического состояния СТС.

Экспертная оценка технического состояния СТС, основывается на использовании набора диагностических признаков и является задачей диагностики технического состояния СТС. В общем виде логическая структура данной задачи может быть представлена в виде графа (рис. 3).

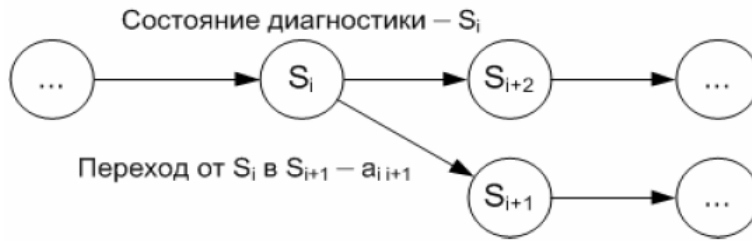


Рис. 3. Логическая структура диагностики технического состояния СТС

Основные усилия при создании ЭС концентрируются на проектировании ее базы знаний (БЗ) [18].

Для формализации процедур эволюции данных в БЗ ЭС может использоваться методика использования стохастических моделей различных типов и уровней: эталонных и текущих (адаптивных), локальных и интегральных. Для их получения применяется база данных (БД) измеряемых параметров, программное обеспечение и БД моделей. Структурная схема ЭС для решения поставленных задач представлена на рис. 4.

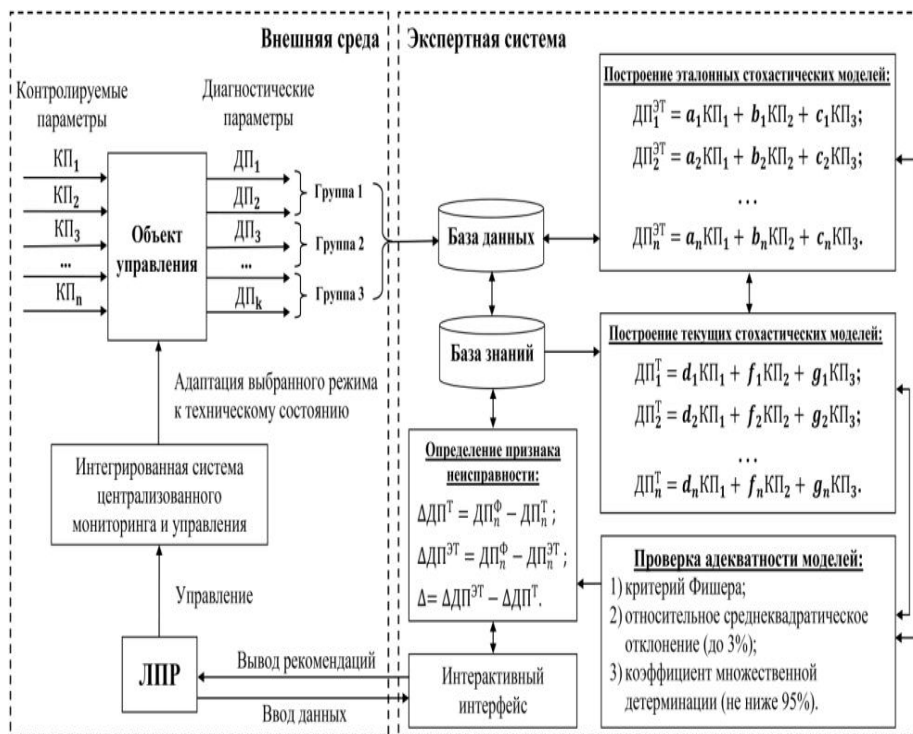


Рис. 4. Взаимодействие ЭС с ЛПР и объектом управления

При использовании метода простой ранжировки эксперт располагает признаки в порядке предпочтения. Достоинства метода: простота процедуры получения оценок; меньшее число экспертов по сравнению с другими методами при оценке одного и того же набора признаков. Недостатки метода: заведомо считается распределение оценок равномерным; уменьшение важности признаков предполагается равномерным, в то время как на практике такого нет. При использовании метода задания весовых коэффициентов всем признакам присваиваются весовые коэффициенты. Они могут быть проставлены способами: весовые коэффициенты назначают всем признакам так, чтобы сумма коэффициентов была равна какому-то фиксированному числу; наиболее важному признаку придают весовой коэффициент, который равен фиксированному числу, а остальным – коэффициенты, равные долям этого числа. При использовании метода последовательных преимуществ отдельный объект сравнивается с суммой последующих объектов для установления его важности. Метод имеет преимущество в сравнении с другими методами, заключающееся в том, что он позволяет сопоставить и измерить качественно различные факторы. Преимущество метода в том, что эксперт при оценивании признаков сам анализирует свои оценки. Недостатки метода в сложности для неподготовленного эксперта и его громоздкость. При использовании метода парных сравнений объекты экспертизы сравниваются попарно для установления наиболее важного в каждой паре. Метод используется для обнаружения преимущества среди значительного количества факторов, проблем, показателей. Эксперты проводят сравнение с констатацией превосходства одного фактора перед другим.

Помимо вышеуказанных математико-статистических методов обработки экспертных оценок, известны разновидности методов экспертных оценок: методы группового опроса экспертов; методы экспертной оценки показателей качества.

К методам группового опроса экспертов относятся: метод Дельфи; метод Паттерн; комбинированный метод. Метод Дельфи – метод опроса экспертов, который основан на последовательно осуществляемых процедурах, направленных на формирование группового мнения экспертов касательно процедур с недостающей информацией. Особенности метода: отказ от совместной работы экспертов; анонимность оценок; регулируемая обратная связь; групповой ответ. Достоинства: из-за анонимности опроса уменьшается авторитарное влияние отдельных доминирующих экспертов; регулируемая обратная связь уменьшает влияние индивидуальных и групповых интересов; обратная связь также повышает критерий объективности и надёжности оценок. Недостатки: сложность опроса экспертов и заполнение анкет; трудоёмкость оценки в связи с большим количеством показателей качества (иногда до 20-40) и заполнением нескольких анкет (3-10); громоздкость записей объяснений из-за отсутствия прямого контакта организатора с экспертами. Метод Паттерн – метод опроса экспертов, основанный на построении иерархической структуры, а также

вынесении постановления этих целей после открытого обсуждения. Метод состоит из нескольких этапов: I этап – постановка основной проблемы, требующей решения, и её разделение на ряд вторичных проблем первого, второго и т.д. порядка, которые делятся на более узкие задачи. В результате такого деления получается дерево целей. II этап – определение с помощью экспертов коэффициентов весомости каждого задания по отношению к основной цели. Эксперты выносят решение после открытого обсуждения в экспертной группе. III этап – применение ЭВМ для обработки полученных данных и их анализа. Преимущества – упрощение процедуры экспертного опроса. Недостатки: отсутствие обоснований оптимального числа членов экспертной группы, а также методики отбора в экспертную группу компетентных специалистов; обработка результатов опроса без учёта различий отдельных экспертов; отсутствие барьеров для проявления конформизма экспертов; недостаточная разработка и неопределённость принципов построения дерева целей. Комбинированный метод – метод, основанный на сочетании индивидуальных и коллективных экспертных оценок. Преимущества: гибкость, исключающая ошибки при опросе экспертов и повышающая достоверность результатов экспертизы; чёткое определение стратегии путём классификации задач по степени значимости и операций по их выполнению; высокая воспроизводимость результатов. К недостаткам метода относится многооперационность, требующая больших затрат времени и средств, но данный недостаток окупается повышенной достоверностью и восстановлению результатов.

Язык нечётких множеств и алгоритмов является наиболее адекватным математическим аппаратом, позволяющим сократить переход от вербального словесного качественного описания объекта, характеризующим человеческое мышление, к численным количественным оценкам его состояния и сформулировать на этой основе простые и эффективные алгоритмы. Т.е. позволяет моделировать человеческие размышления и человеческую способность решения задач. Поэтому целесообразно использование нечеткой логики при разработке приложений (оболочек) для создания экспертных систем [19-21].

Часто априорной информации недостаточно для принятия гипотезы о предпочтительной модели, а выборка апостериорных данных (результатов контроля) слишком мала для каких-либо статистических выводов. В таких случаях, чаще всего, получение достаточно достоверных результатов прогноза обеспечивают методы теории нейронных сетей (метод Розенблатта, метод Видроу-Хоффа, метод обратного распространения, метод Хебба). Эти методы используются при решении задач оценки состояния и прогнозирования изменений параметров систем ответственного назначения. Главным достоинством этих методов является свойство обучения и обобщения. Оно состоит в том, что после многократного предъявления сети обучающих примеров, она способна давать правильные ответы на любые входные данные из обучающего множества.

Свойство обобщения позволяет сети после обучения и тестирования давать правильные ответы и на любые другие входные данные, которые не являются данными обучающего множества. Недостатком нейросетевых методов прогноза технического состояния СТС является необходимость привлечения обучающей выборки, размеры которой и достоверность (точность) её элементов (результатов измерения параметров состояния) сильно влияют на результаты обучения, а, следовательно, и на качество прогноза [21].

Из результатов проведенного анализа ЭС следует, что они обладают такими общими недостатками: знания не всегда легкодоступны (трудно извлекаемые знания из экспертов); частые случаи существования нескольких правильных оценок; ограничение временем; пользователи имеют ограничения в знании предмета; хорошо работают только в узкой области знаний; многие эксперты не имеют независимое средство для проверки достоверности результатов; словарь часто ограничен и его трудно понять; дорогостоящая помощь от инженеров; уязвимость в распознавании границ своих возможностей, и демонстрация ненадёжного функционирования вблизи границ их применимости; большие трудозатраты, которые необходимы для пополнения БЗ.

Необходимость интеграции парадигмы искусственного интеллекта с другими парадигмами (подходы и методы математической статистики, имитационное моделирование, технология программирования и т.д.) для создания стала причиной применения гибридных экспертных систем (ГЭС) для противоаварийного управления СТС [22-25]. ГЭС относятся к комбинированным гибридным интеллектуальным системам, являясь интеграцией ЭС и нейронных сетей. При этом они соединяют как формализуемые (в ЭС), так и неформализуемые знания (в нейронных сетях). Главное преимущество ГЭС заключается в том, что они способны решать задачи, которые не решаются отдельными методами искусственного интеллекта. Сфера применения ГЭС для противоаварийного управления СТС расширяется. Причина этого в том, что: ГЭС решают неформализованные или плохо формализованные задачи относительно более широкого круга, чем ЭС; при решении практических задач ГЭС достигают результатов, которые не уступают, а иногда и превосходят возможности экспертов. Гибридность ЭС определяется двумя модулями в её составе: первый – обеспечивает поддержку принятия решений на основании прецедентов в функциональных структурно-связанных элементах СТС; второй – обеспечивает поддержку принятия решений на основании причинно-следственного комплекса возникновения отказов и аварий.

Основной интеллектуальный компонент ГЭС, как и ЭС – БЗ. Для программной реализации знаний можно использовать продукционно-фреймовые модели. Декларативные и процедурные знания трех классов: предметные знания, управляющие и метазнания. Предметные знания отображаются в виде фреймов, а управляющие знания, которые необходимы

для поиска и генерации семантического решения неформализованной задачи, и метазнания отображаются в виде продукционных правил.

При решении задач диагностики технического состояния при противоаварийном управлении СТС гибридные модели имеют следующие преимущества (рис. 5): использование различных методов решения для разных подзадач; при изменении в механизме решения одной подзадачи не возникает необходимости в корректировке других подзадач; применение различных методов решения к одной подзадаче и возможность сравнения результатов решения; агрегирование информации в рамках гибридной модели не приводит к её потере, возможность восстановления всех данных вплоть до первичных показателей.



Рис. 5. Пример структуры ГЭС

Архитектура ГЭС (рис. 6) образована совокупностью трёх функциональных блоков, реализованных в виде программных комплексов: БЗ; блока вывода решения, предназначенного для генерации семантического решения с применением продукционных правил; интерфейса пользователя.

ГЭС могут основываться на методах: создания баз данных, баз знаний; углубленного анализа данных; линейного программирования; системного анализа; моделирования [11]. Главная задача при разработке ГЭС – сочетание разных форм методов и представлений обработки знаний при принятии решений в условиях неопределённости.

На рис. 7 в качестве примера приведена структурная системы противоаварийного управления системой электроснабжения предприятия, состоящая из двух интеллектуальных нейронных сетей (ИНС). Первая ИНС используется для оценивания возможных перегрузок, вызванных аварийными отключениями элементов электрической сети. Обучение ИНС производится в автономном режиме с помощью серий расчётов режимов системы для различных схемно-режимных ситуаций.



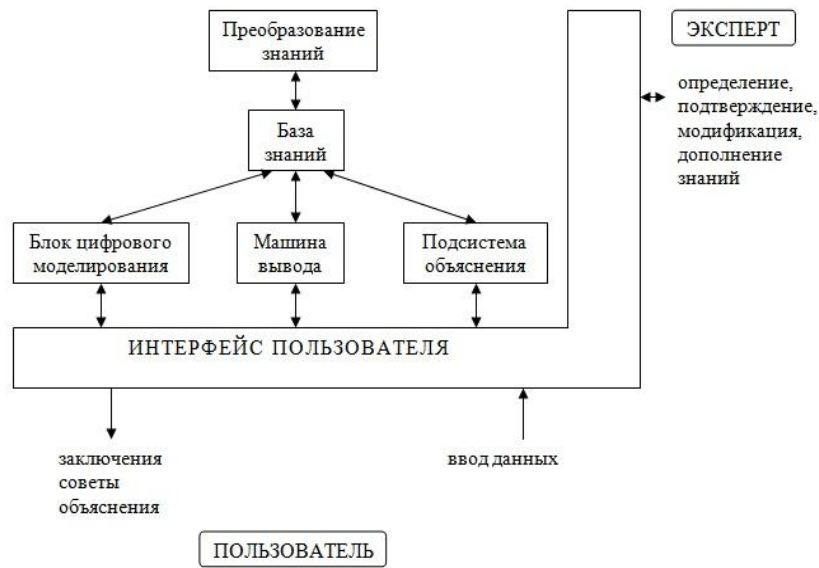


Рис. 6. Пример архитектуры ГЭС

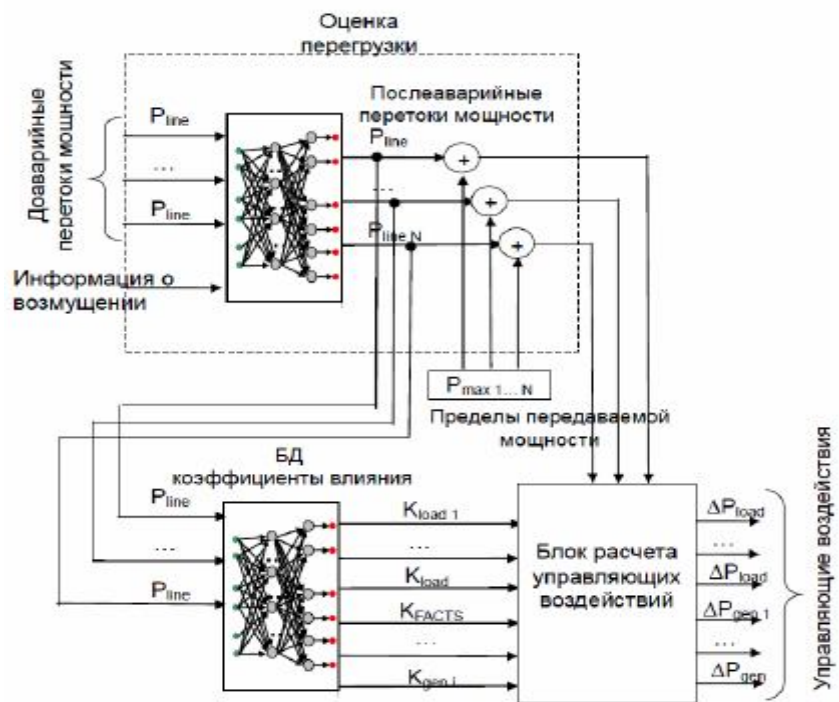


Рис. 7. Структура системы противоаварийного управления из ИНС

Мобильность приведенной ГЭС основана на мобильности БЗ, а также возможности пополнения этой БЗ различными информационными составляющими и процедурами вывода (рис. 8). При этом экспертные знания из-за их субъективного характера – неточны. По причине приближенности и многозначности знаний ГЭС имеет дело не с одной, а с несколькими альтернативными областями. Из этого следует, что неполнота знаний, позволяет использовать не один, а несколько источников знаний.

Любая ГЭС имеет свои требования к форме представления знаний. Однако из-за того, что они различны (фреймы, семантические сети, БД, понятия в БЗ ЭС, нейросети, нечёткая логика, генетические алгоритмы), то ГЭС сложно объединить эти знания даже в рамках единого информационного пространства. Например, в ГЭС (рис. 9) разнородные знания хранятся в статической ЭС, а динамические знания – в нейронных сетях.

Консультации экспертов, находящихся на значительном удалении от потребителя знаний, можно получить в реальном времени благодаря современным технологиям. Например, технологии Web-ориентированных ГЭС. Они представляют собой программный комплекс, агрегирующий стандартные пакеты прикладных программ, средства манипулирования знаниями и Web-оболочку.

Вторая ИНС служит для адаптации коэффициентов влияния. На вход ИНС подается информация по послеаварийному режиму.

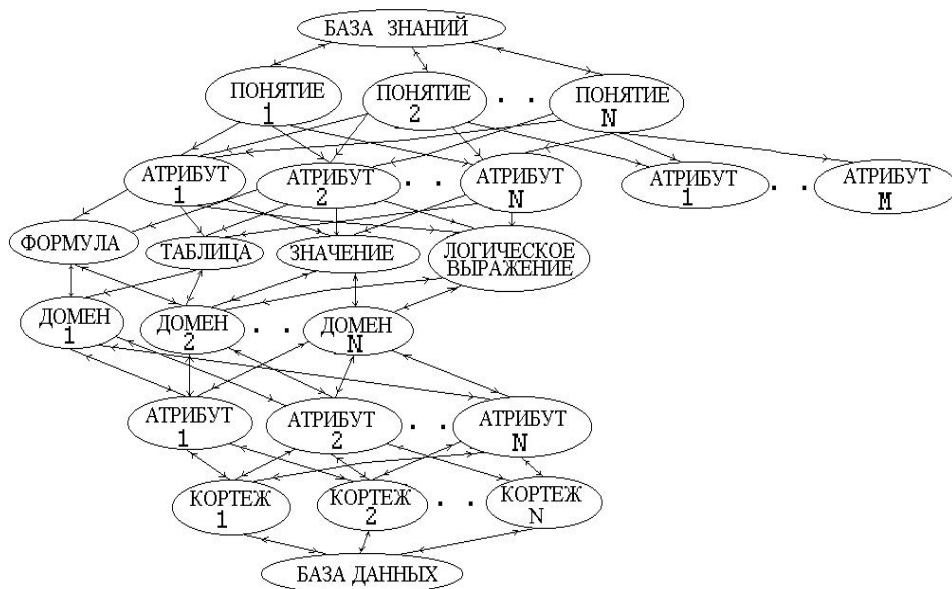
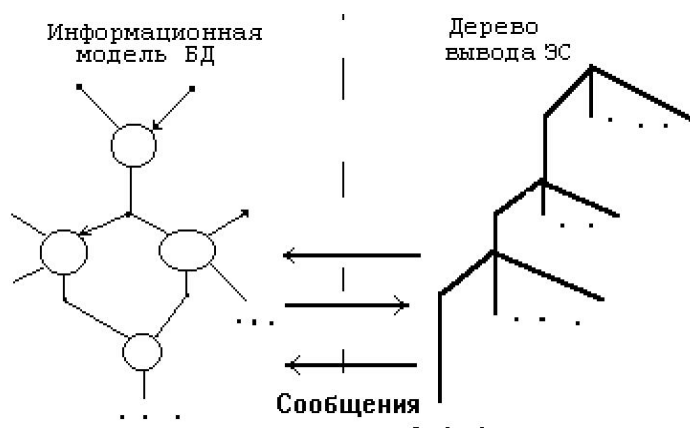


Рис. 8. Модель БД и БЗ в ГЭС



*Рис. 9. Диагностическая нейро-нечёткая ЭС*



*Рис. 10. Обмен данными между БЗ и БД в ГЭС*

Проведенный анализ ГЭС показал, что существуют проблемы применения подобных систем для противоаварийного управления СТС: сложность систем; разнообразие систем; недостаточная изученность их и протекающих в них и окружающей среде процессов и некоторых программ при их реализации.

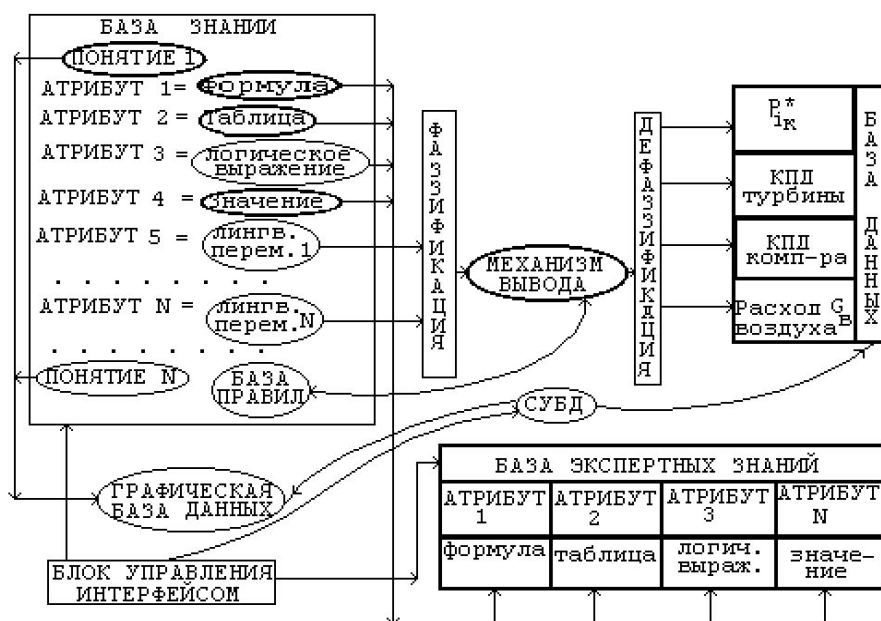


Рис. 11. Обмен разнородными знаниями в подсистемах ГЭС

**Выводы.** Проведенный анализ информационных материалов показал, что существующие технологии ГЭС, используемые для противоаварийного управления СТС, обладают рядом недостатков, связанных как с техническими ограничениями, так и с обработкой большого объема информации.

В связи с этим возникает необходимость в дальнейшем совершенствовании методов противоаварийного управления СТС с использованием технологии ГЭС, основанной на диагностике и прогнозировании технического состояния СТС.

### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Вычужанин В.В., Рудниченко Н.Д. Технические риски сложных комплексов функционально взаимосвязанных структурных компонентов судовых энергетических установок / В.В. Вычужанин, Н.Д. Рудниченко // Вісник Одеського національного морського університету: Зб. наук. праць. – Одеса: ОНМУ, 2014. – Вип. 2(41). – С. 68-77.
2. Вычужанин В.В. Метод управления рисками судовых сложных технических систем / В.В. Вычужанин, Н.Д. Рудниченко // Проблеми техніки. – 2014. – Вип. 2. – С. 138-142.

3. Вычужанин В.В. Модель оценки живучести судовых технических систем / В.В. Вычужанин, В.Д. Бойко // Вісник Миколаївського кораблебудівного університету. – 2012. – Вип. 3. – С. 62-67.
4. Вычужанин В.В. Повышение эффективности эксплуатации судовой системы комфортного кондиционирования воздуха при переменных нагрузках. Монография / В.В. Вычужанин. – Одесса: ОНМУ, 2009. – 206 с.
5. Вычужанин В.В. Математические модели нестационарных режимов воздухообработки в центральной СКВ / В.В. Вычужанин // Вісник Одеського нац. морського університету: Зб. наук. праць. – Одеса: ОНМУ, 2007. – Вип. 23. – С. 172-185.
6. Гузанов А.Н. Морские компьютерные системы управления техническими средствами судов: Учебное пособие / А.Н. Гузанов, Л.И. Ковтун. – СПб.: СПбГУВК, 2001. – 127 с.
7. Ковтун Л.И. Современные информационные технологии в процессах управления борьбой за живучесть корабля / Л.И. Ковтун // Судостроение, 2002. – № 3. – С. 20-24.
8. Буянов В.П. Рискология (управление рисками) / В.П. Буянов, К.А. Кирсанов, Л.М. Михайлов. – М.: Изд-во «Экзамен», 2003. – 384 с.
9. Ручкин, В.Н. Универсальный искусственный интеллект и экспертные системы / В.Н. Ручкин, В.А. Фулин. – СПб.: БХВ-Петербург, 2009. – 240 с.
10. Рассел С. Искусственный интеллект: современный подход / С. Рассел, П.Норвиг. – М.: ООО «ИД Вильямс», 2006. – 1408 с.
11. Попов Э.В. Искусственный интеллект. Кн. 1. Системы общения и экспертные системы / Э.В. Попов. – М.: Радио и связь, 1990. – 464 с.
12. Муromцев Д.И. Введение в технологию экспертных систем / Д.И. Муromцев. – СПб.: СПб ГУ ИТМО, 2005. – 93 с.
13. Джаратанно Д. Экспертные системы: принципы разработки и программирование / Д. Джаратанно, Г. Райли. – М.: ООО «ИД Вильямс», 2007. – 1152 с.
14. Liebowitz J. Worldwide Perspectives and Trends in Expert Systems. An Analysis Based on the Three World Congresses on Expert Systems / Jay Liebowitz. – 1997. – № 2. – С. 115-119.
15. Балтрашевич В.Э. Реализация инструментальной экспертной системы / В.Э. Балтрашевич. – СПб.: Политехника, 1993. – 237 с.
16. Абрахам А. Экспертные системы на основе правил / А. Абрахам, П.Н. Семченко // Вестник ТОГУ. – 2013. – № 3(30). – С. 29-40.

17. Головка С.В. Диагностика технического состояния судового электрооборудования на основе интеллектуального анализа данных / С.В. Головка // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Управление, вычислительная техника и информатика, 2009. – С. 90-95.
18. Гаврилова Т.А. Базы знаний интеллектуальных систем / Т.А. Гаврилова, В.Ф. Хорошевский. – СПб.: Питер, 2001. – С. 384.
19. Полковникова Н.А. Разработка модели экспертной системы на основе нечёткой логики / Н.А. Полковникова, В.М. Курейчик // Известия ЮФУ. Технические науки. – С. 83-92.
20. Vichuzhanin V. Realization of a fuzzy controller with fuzzy dynamic correction / V. Vichuzhanin // Central European Journal of Engineering. – 2012. – Т. 2. – Вып. 3. – P. 392-398
21. Рутковская Д. Нейронные сети, генетические алгоритмы и нечеткие системы / Д. Рутковская, М. Пилинский, Л. Рутковский. – СПб.: Горячая линия-Телеком, 2006. – 452 с.
22. Гаврилов А.В. Гибридные интеллектуальные системы / А.В. Гаврилов. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2003. – 164 с.
23. Батыршин И.З. Нечеткие гибридные системы. Теория и практика / И.З. Батыршин, А.О. Недосекин. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2007. – 208 с.
24. Вычужанин В.В. Диагностика, контроль при эксплуатации и ремонте систем кондиционирования воздуха на основе гибридных нейронечетких экспертных систем / В.В. Вычужанин // Вісник ОНМУ: Зб. наук. праць. – 2010. – Вып. 30. – С. 100-108.
25. Lucas J. A hybrid recommendation approach for a tourism system / J. Lucas, N. Luz, M. Moreno et al. // Expert Systems with Applications. – 2013. – № 40. – С. 3532-3550.
26. Polach P. Hybrid expert system shell / P. Polach, J. Valenta, V. Jirsik // Proceedings of the 4th EUROPEAN COMPUTING CONFERENCE. – 2010. – P. 148-153.

Стаття надійшла до редакції 29.05. 2017

**Рецензенти:**

доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри «Експлуатація суднового електрообладнання та засобів автоматики» Одеського національного морського університету **В.О. Яровенко**

доктор технічних наук, професор, професор кафедри «Судноремонт» Одеського національного морського університету **В.П. Сторожев**