

# ИНФОРМАТИЗАЦИЯ ДИСТАНЦИОННОГО ДИАГНОСТИРОВАНИЯ СОСТОЯНИЯ СЛОЖНЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

С.Н. Коновалов, В.В. Вычужанин

Одесский национальный морской университет,  
ул. Мечникова 34, Одесса, 65404, Украина, e-mail: vint532@yandex.ru

Приведены результаты разработки и информатизации метода дистанционного мониторинга, диагностики сложных технических систем, установленных на судах. Проведен анализ используемых методов мониторинга, диагностики технических систем. Описан метод дистанционного мониторинга, диагностики, основывающийся на экспертном анализе состояния сложных технических систем. Приведены результаты разработки нечеткой модели для диагностирования сложной технической системы, а также результаты ее исследования. Применение разработанного метода и его информатизация позволяет оценить работоспособность сложной технической системы в различных условиях и режимах ее эксплуатации, а также прогнозировать состояние системы в аварийных экстремальных ситуациях.

**Ключевые слова:** сложная техническая система, мониторинг, диагностика, прогнозирование, экспертный анализ, нечеткая модель

## Введение

Безопасность мореплавания связана с обеспечением работоспособности, а значит надежности эксплуатации судовых сложных технических систем (СТС). В результате переменных режимов и условий эксплуатации СТС их работоспособность снижается, возрастает вероятность возникновения отказов систем [1,2]. Переход к обеспечению эксплуатационной надежности технологического оборудования по его «фактическому состоянию» вызывает необходимость предпринимать меры по предупреждению и обнаружению причин возникновения отказов СТС, обязательного создания систем технического мониторинга и диагностики их состояния.

Оценка работоспособности оборудования непосредственно на судне осуществляется на основе измерений и анализа диагностических параметров СТС, число которых, а также их взаимосвязей велико. Решение проблемы заключается в применении информационных систем дистанционного мониторинга и диагностирования (ДМД) состояния СТС. При этом имеется возможность учитывать диагностические признаки различной природы, получать решения в условиях неполной, нечеткой информации.

В настоящее время проектируются и эксплуатируются информационные системы ДМД, основывающиеся на различных методах мониторинга, диагностики состояния СТС [3-8]. Сложность технических систем, разнообразие условий эксплуатации требуют пересмотра существующих концепций построения систем ДМД и поиска новых. Информация, используемая для постановки диагноза, в большинстве случаев является нечеткой. Для развития методов диагностики СТС в последние годы установлена целесообразность применения математического аппарата нечеткой логики для определения критериев оценки состояния оборудования и принятия диагностических решений. Данный метод базируется на сочетании традиционных

средств оперативного контроля с экспертными системами, построенными с использованием методов нечеткой логики [1,2]. Хотя средства автоматизации контроля технического состояния СТС появились давно, в настоящее время еще не создана такая система ДМД, которая бы комплексно оценивала текущее состояние судовых СТС, обеспечивала раннее обнаружение дефектов и прогнозировала развитие процессов. Существующие диагностические методы базируются на математических моделях, способных отображать лишь часть свойств и режимов работы судовых СТС. Отсутствие научных методов, позволяющих решать задачи создания систем ДМД на базе информационных технологий, объясняет причину того, что в морехозяйственном комплексе процент успешных внедрений таких систем очень низкий. Несмотря на многообразие существующих методов ДМД, они нуждаются в дальнейшем развитии для судовых СТС.

Таким образом, решение задачи обеспечения эксплуатационной надежности судовых СТС по их «фактическому состоянию» путем создания и внедрения экспертной системы с использованием нечеткой логики актуально. От решения задачи зависит эффективность функционирования удаленных от диагностических центров СТС в экстремальных условиях эксплуатации.

## Цель статьи

*Целью* статьи является создание нечеткой экспертной системы мониторинга и диагностики состояния судовых СТС для качественной оценки их состояния.

## Основная часть

Алгоритм построения информационной системы ДМД СТС приведен на рис.1. Его реализация позволяет систематизировать метод диагностики с разделением процесса разработки на логически завершённые этапы. Динамика изменений в экспертной системе СТС отображается при задании множеств лингвистических переменных, терм-множеств, нечетких переменных, базовых множеств, функций принадлежности, баз данных в задании нечетких критериев и нечетких отношений.

Входные данные:

1. Нелингвистические (точные) переменные:  $x_1; x_2; x_3$ .  $\{x_1, x_2, x_3\} \in X$  – множество нелингвистических переменных. Нелингвистические переменные задаются как показатели работы СТС, по которым, используя вывод Сугено, определяется работоспособность системы.

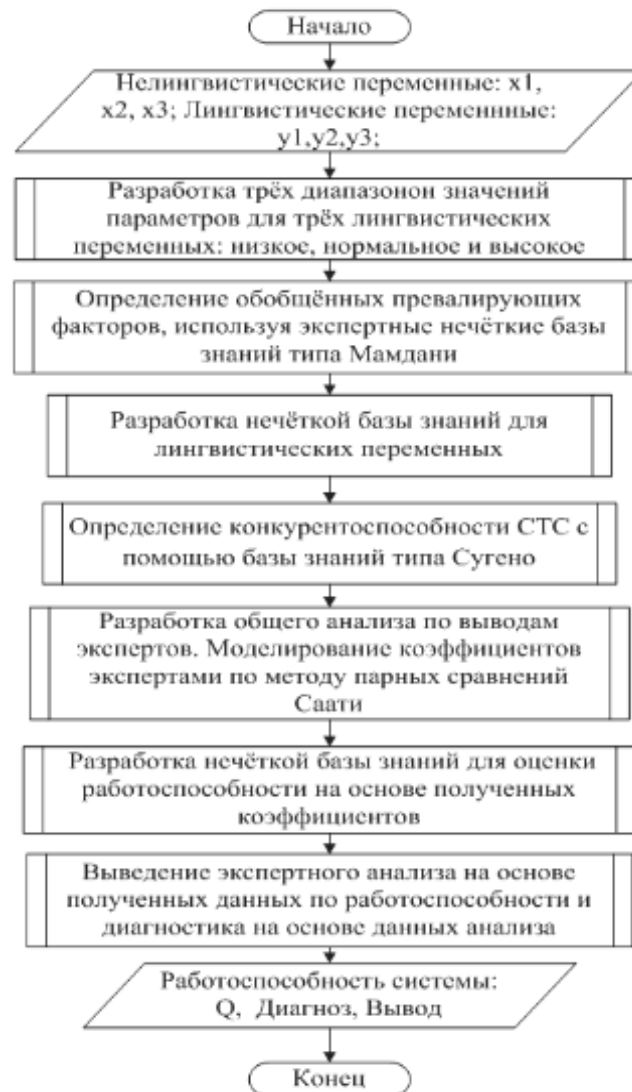
2. Лингвистические переменные:  $y_1; y_2; y_3$  – комплексный критерий качества, построенный на основе функций желательности Харрингтона.  $D = y_3$  – лингвистические переменные.  $\{y_1, y_2, y_3\} \in Y$  – множество лингвистических переменных.

Значение каждого из лингвистических параметров диагностики  $y_u$ , которых в задаче может быть сколь угодно много, переводится в соответствующую желательность  $d_u$ :

$$d_u = \exp[-\exp(-y_u)].$$

Значения лингвистических переменных определяются по выводу Мамдани. Функция желательности  $D$  – среднее геометрическое желательностей отдельных оценочных параметров:  $D = \sqrt[q]{y_1 \cdot y_2 \cdot y_3}$ , где  $q$  – число параметров диагностики. Все

параметры, как лингвистические, так и нелингвистические, получены динамическим мониторингом СТС.



**Рис. 1.** Алгоритм построения информационной системы ДМД СТС

Выходные данные:

$Q$  – работоспособность системы;  $Q \in [0,100]$ .

Модель работоспособности СТС представляет собой функциональное отображение вида

$$X = (x_1, x_2, x_3) \cap Y = (y_1, y_2, y_3) \rightarrow Q \in [0,100].$$

Нечёткое множество

$$\mu(X) \cap \mu(Y) = \mu_{\tilde{A} \rightarrow B}(Q) \mu(X) \cap \mu(Y) = \mu_{\tilde{A} \rightarrow B}(Q),$$

где  $\tilde{A}$  – нечёткое множество,  $B$  – чёткое множество.

При разработке базы знаний экспертной системы использованы результаты индексирования, преобразованных в три диапазона значений параметров соответственно для трёх лингвистических переменных: низкие ( $H$ ), средние ( $C$ ) и высокие ( $B$ ), представленных в табл. 1.

Таблица 1.

Значения параметров в диапазонах лингвистических переменных

Лингвистическая переменная	Значение параметров		
	низкое	среднее	высокое
$y_1$	$[a_1...b_1]$	$[b_1...c_1]$	$[c_1...d_1]$
$y_2$	$[a_2...b_2]$	$[b_2...c_2]$	$[c_2...d_2]$
$y_3$	$[a_3...b_3]$	$[b_3...c_3]$	$[c_3...d_3]$

В табл.1  $a_i, b_i, c_i, d_i, i = \overline{1,3}$  – граничные значения параметров лингвистических переменных. Промежуточные значения параметров определяются как отклонения от усредненных показателей.

При моделировании укрупненных влияющих факторов используются экспертные нечёткие базы знаний типа Мамдани. Элементы antecedentes нечётких правил, основанных на опыте экспертов, связаны логической операцией «И», представлены в табл.2.

Таблица 2.

Нечёткая база знаний для лингвистических переменных

$y_1$	$y_2$	$y_3$	Y
В	В	В	В
В	В	С	В
В	С	В	В
В	С	С	В
С	В	В	В
Н	Н	Н	Н
Н	Н	С	Н
Н	С	Н	Н
Н	С	С	Н
С	Н	Н	Н
В	Н	С	С
В	С	Н	С
Н	В	С	С
Н	С	В	С
С	В	Н	С
С	Н	В	С
С	С	С	С

Работоспособность судовой СТС исследуется с учётом трёх типов показателей лингвистических переменных. Границы подобластей с постоянными эластичностями работоспособности – нечёткие, что обусловлено плавным переходом одного типа показателей в другой.

Предлагается нечёткая база знаний типа Сугено для моделирования конкурентоспособности ТС. Каждое правило базы знаний моделирует один тип. Коэффициенты в заключениях правил задают чувствительность конкурентоспособности по соответствующим факторам.

Каждому элементу множества соответствует своя степень принадлежности: чем выше степень принадлежности, тем больше вероятность того, что значение параметра в

норме. Функции принадлежности или информация для их построения задаются экспертами на основе субъективных предпочтений и не носят случайного характера.

По нелингвистическим и лингвистическим переменным, осуществляется общий анализ по выводам экспертов. Коэффициенты уравнения определения работоспособности выбираются экспертами по методу парных сравнений Саати, результаты которых (в общем виде) для первой нелингвистической переменной  $x_1$  в табл.3.

**Таблица 3.**

Результат парных сравнений экспертов для первой нелингвистической переменной  $x_1$

	В	С	Н
В	1/1	$f/1$	$g/1$
С	$1/f$	1/1	$f/1$
Н	$1/g$	$1/f$	1/1

В табл.3  $f$  – значение отношения В к С,  $g$  – значение отношения В к Н для первой нелингвистической переменной. Действия над дробями для первой нелингвистической переменной приведены в табл.4.

**Таблица 4.**

Действия над дробями для первой нелингвистической переменной  $x_1$

	$B$	$C$	$H$	$\sum_{x1}$	Отношение
$B$	1	$f$	$g$	$\sum_{x11} = 1 + f + g$	$\sum_{x11} / \sum_{x1}$
$C$	$1/f$	1	$f$	$\sum_{x12} = 1/f + 1 + f$	$\sum_{x12} / \sum_{x1}$
$H$	$1/g$	$1/f$	1	$\sum_{x13} = 1/g + 1/f + 1$	$\sum_{x13} / \sum_{x1}$
				$\sum_{x1} = \sum_{x11} + \sum_{x12} + \sum_{x13}$	$\sum_{x1} / \sum_{x1}$

В табл.4  $\sum_{x11}$  - строчная сумма для значения  $B$ ,  $\sum_{x12}$  - строчная сумма для значения  $C$ ,  $\sum_{x13}$  - строчная сумма для значения  $H$ ,  $\sum_{x1}$  - общая сумма строчных сумм первой нелингвистической переменной. Подобные расчёты делаются и для нелингвистических переменных  $x_2$  и  $x_3$  соответственно. Веса обобщённой лингвистической переменной для разных значений приведены в табл.5.

В табл.5  $\sum_{x21}$  - строчная сумма для значения  $B$ ,  $\sum_{x22}$  - строчная сумма для значения  $C$ ,  $\sum_{x23}$  - строчная сумма для значения  $H$ ,  $\sum_{x2}$  - общая сумма строчных сумм второй нелингвистической переменной;  $\sum_{x31}$  - строчная сумма для значения  $B$ ,  $\sum_{x32}$  - строчная сумма для значения  $C$ ,  $\sum_{x33}$  - строчная сумма для значения  $H$ ,  $\sum_{x3}$  - общая сумма строчных сумм третьей нелингвистической переменной;  $\sum_v$  - строчная сумма для значения  $B$ ,  $\sum_c$  - строчная сумма для значения  $C$ ,  $\sum_n$  - строчная сумма для значения  $H$ ,  $\sum$  - общая строчная всех значений для всех переменных. С учетом коэффициентов уравнения определения работоспособности которых построена нечёткая база знаний (табл.6).

Таблица 5.

Веса обобщённой лингвистической переменной для разных значений

	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$\Sigma$	Среднее
$B$	$\sum_{x11}/\sum_{x1}$	$\sum_{x21}/\sum_{x2}$	$\sum_{x31}/\sum_{x3}$	$\sum_{\epsilon} = \sum_{x11}/\sum_{x1} + \sum_{x21}/\sum_{x2} + \sum_{x31}/\sum_{x3}$	$\sum_{\epsilon}/\Sigma$
$C$	$\sum_{x12}/\sum_{x1}$	$\sum_{x22}/\sum_{x2}$	$\sum_{x32}/\sum_{x3}$	$\sum_c = \sum_{x12}/\sum_{x1} + \sum_{x22}/\sum_{x2} + \sum_{x32}/\sum_{x3}$	$\sum_c/\Sigma$
$H$	$\sum_{x13}/\sum_{x1}$	$\sum_{x23}/\sum_{x2}$	$\sum_{x33}/\sum_{x3}$	$\sum_{\#} = \sum_{x13}/\sum_{x1} + \sum_{x23}/\sum_{x2} + \sum_{x33}/\sum_{x3}$	$\sum_{\#}/\Sigma$
				$\Sigma = \sum_{\epsilon} + \sum_c + \sum_{\#}$	$\Sigma/\Sigma$

Таблица 6.

Нечёткая база знаний для оценки работоспособности

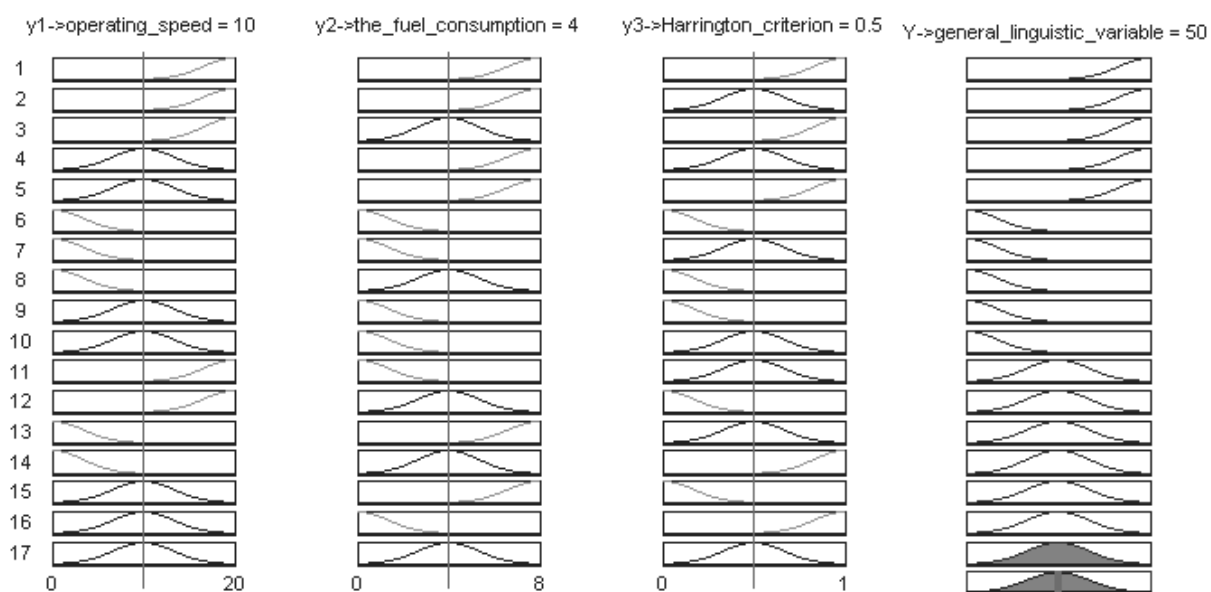
$x_1$	$x_2$	$x_3$	$Y$	$Q$
$x_1$	$x_2$	$x_3$	Высокое	$\sum_{x11}/\sum_{x1} \cdot x_1 + \sum_{x21}/\sum_{x2} \cdot x_2 + \sum_{x31}/\sum_{x3} \cdot x_3 + \sum_{\epsilon}/\Sigma \cdot Y$
$x_1$	$x_2$	$x_3$	Среднее	$\sum_{x12}/\sum_{x1} \cdot x_1 + \sum_{x22}/\sum_{x2} \cdot x_2 + \sum_{x32}/\sum_{x3} \cdot x_3 + \sum_c/\Sigma \cdot Y$
$x_1$	$x_2$	$x_3$	Низкое	$\sum_{x13}/\sum_{x1} \cdot x_1 + \sum_{x23}/\sum_{x2} \cdot x_2 + \sum_{x33}/\sum_{x3} \cdot x_3 + \sum_{\#}/\Sigma \cdot Y$

Нечёткая модель экспертной системы в Matlab реализована двумя системами нечёткого вывода:  $q\_y.fis$  – нечёткая система моделирования общей оценки лингвистических переменных ( $Y$ );  $q\_q.fis$  – нечёткая система прогнозирования работоспособности системы ( $Q$ ).

Диагностика осуществляется функцией `diag.m`. Функция может возвращать два выходных аргумента: первый аргумент – результат прогнозирования работоспособности системы; второй аргумент – общей оценки лингвистических переменных. Функция вызывается с 6 входными аргументами, которые задают значения факторов  $x_1, x_2, x_3, y_1, y_2, y_3$ . Значения факторов  $y_1, y_2, y_3$  можно задавать как числами, так и термами: «Н» - низкий; «НС» - ниже среднего; «С» - средний; «ВС» - выше среднего; «В» - высокий. Для логического вывода при нечётких входных данных используется функция `qgaussmf`, модифицированная из гауссовской функции принадлежности `gaussmf`. Расчёт степени принадлежности одного нечёткого множества к другому нечёткому множеству осуществляется функцией `qual_inp_gauss`. Логический вывод происходит через функцию `evalfis_wv`, которая аналогична функции `evalfis`, но не выдает предупреждений при использовании нечетких входных данных.

При разработке модуля экспертной системы для идентификации неисправностей на примере судовых паровых котлов. Входными параметрами являются давление пара, уровень воды в котле, давление топлива и температура выпускаемого пара. Выходные параметры - работоспособность котла (низкая работоспособность, средняя

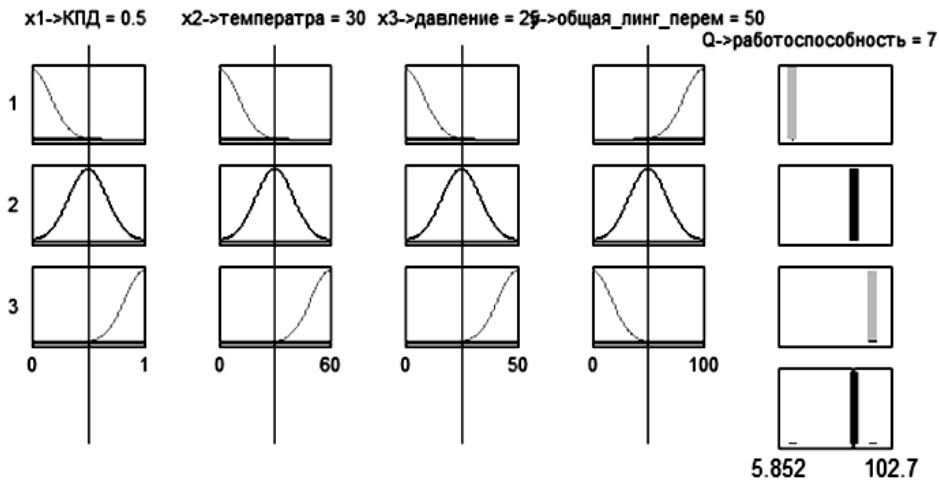
работоспособность, высокая работоспособность). Для каждого параметра в числовом эквиваленте (для типа Сугено): низкое (от 1 до 6), среднее (от 7 до 19) и высокое (от 20 до 100). Правила сгенерированной системы нечёткого вывода для значения общей оценки лингвистических переменных  $Y$  приведены на рис.2, а для значения работоспособности системы  $Q$  приведены на рис.3. Визуализация соответствующей поверхности нечёткого вывода для значения работоспособности системы  $Q$  на рис 4. Поверхность нечёткого вывода позволяет установить зависимость значений работоспособности от значений входных переменных нечёткой модели системы управления объектом при фиксировании остальных переменных на основном уровне. Эта зависимость может послужить основой для программирования контроллера или аппаратной реализации соответствующего нечеткого алгоритма управления в форме соответствующей таблицы решений.



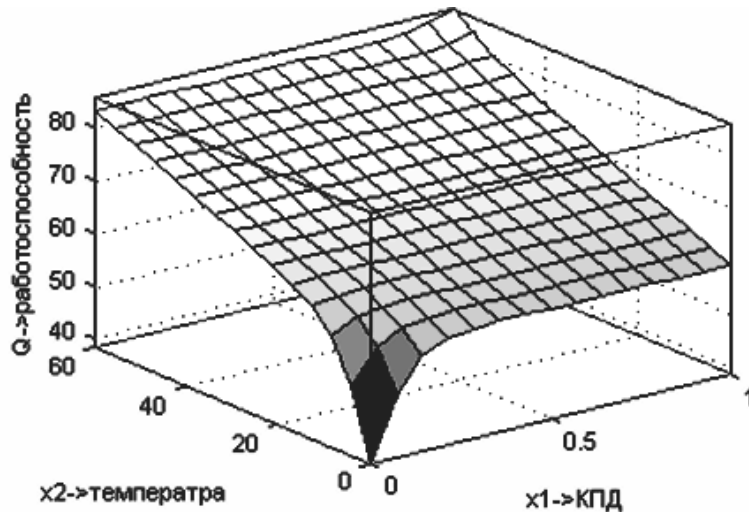
**Рис. 2.** Правила сгенерированной системы нечёткого вывода для значения общей оценки лингвистических переменных  $Y$

На заключительном этапе производится построение схемы блочной модели в среде интерактивного моделирования Simulink. В качестве компонентов системы используются контроллеры, входами, которых являются параметры рабочего процесса и характеристики (возраст, время эксплуатации) соответствующего компонента. Выходом может быть остаточный ресурс компонента или величина воздействия на ресурс.

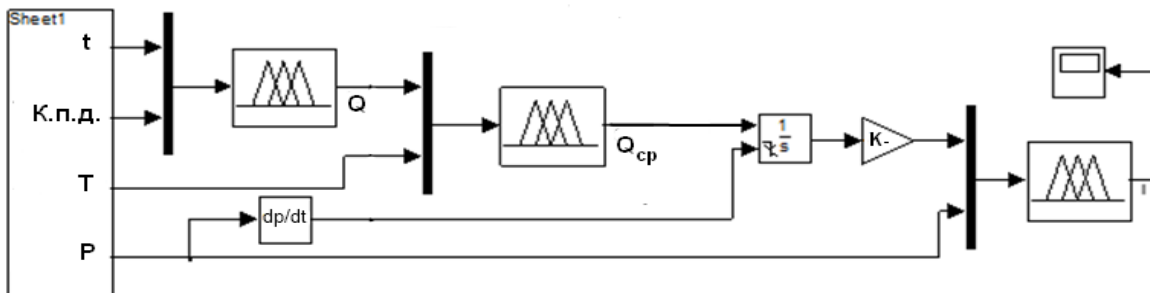
На рис.5 приведен возможный вариант компоновки такой схемы с четырьмя входными переменными  $t$  (температура), к.п.д.,  $T$  и  $P$ , тремя уровнями нечёткого вывода, дифференциальной оценкой переменной  $P$  и интегральной оценкой вывода второго уровня  $Q_{cp}$ . На основании значений переменных  $t$ , к.п.д. определяется текущее значение переменной  $Q$ , которое уточняется на основании значения  $T$ . Переменная  $P$  - значение срока эксплуатации тестируемого оборудования, дифференциальные оценки, которой позволяют дополнить недостающие значения усредненными значениями переменной  $Q_{cp}$  и сброса интегральной оценки к 0 в случае замены оборудования. Последний уровень определяет окончательный вывод о состоянии оборудования в зависимости от накопления (интегральной оценки) значений  $Q_{cp}$  и срока службы оборудования.



**Рис. 3.** Правила сгенерированной системы нечёткого вывода для значения работоспособности системы  $Q$



**Рис. 4.** Визуализация соответствующей поверхности нечёткого вывода для значения работоспособности системы  $Q$



**Рис. 5.** Пример экспертной системы, построенной в среде Matlab Simulink

На основе данных, полученных при разных критериях, работоспособность СТС зависит как от значений нелингвистических переменных, так и от значения



лингвистических переменных и может колебаться как резко вверх, так и резко вниз в зависимости от комбинации этих переменных.

Практическая ценность полученных результатов состоит в том, что предложенный метод создания системы ДМД СТС по ее фактическому состоянию позволяет повысить эффективность оборудования судовых СТС за счет снижения времени простоев оборудования в ремонте, снизить затраты на ремонты и послеаварийное восстановление оборудования.

## Выводы

Впервые разработаны методологические основы и принципы нового для судовых СТС научного направления – реализация интеллектуальных систем контроля и анализа функционирования СТС с использованием экспертной нечеткой информации.

Применение предлагаемого метода позволяет оценить работоспособность любой судовой технической системы при минимальной информации о ней. Результаты работы действующей нечеткой модели, разработанной на основе применения экспертного анализа данных, позволяют с высокой точностью оценить работоспособность судовых технических систем и принимать решение по дальнейшему применению данной системы.

## Список литературы

1. Вычужанин, В.В. Метод управления рисками судовых сложных технических систем / В.В. Вычужанин, Н.Д. Рудниченко // Проблемы техники. – 2014. – №2. – С. 138 – 142.
2. Вычужанин, В.В. Технические риски сложных комплексов функционально взаимосвязанных структурных компонентов судовых энергетических установок / В.В. Вычужанин, Н.Д. Рудниченко // Вісник Одеського національного морського університету, збірник наукових праць. – 2014. – В.2(40). – С. 68 – 77.
3. Бакланов, А.И. Системы наблюдения и мониторинга / А.И. Бакланов. – М.: Бином, 2009. – 234 с.
4. Кончаков, Е.И. Техническая диагностика судовых энергетических установок / Е.И. Кончаков. – Владивосток. : ДВГТУ, 2007. – 112 с.
5. Головкин, С.В. Диагностика технического состояния судового электрооборудования на основе интеллектуального анализа данных / С.В. Головкин. // Вестник АГТУ. Сер.: Управление, вычислительная техника и информатика. – 2009. – С. 90 – 95.
6. Одинцов, В.И. Диагностирование технического состояния дизелей по параметрам рабочего процесса / В.И. Одинцов, С.А. Кабыш. // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Морская техника и технология. – 2012. – С. 123 – 128.
7. Andersen, B.A Diagnostic System for Remote Real-Time Monitoring of Marine Diesel-Electric Propulsion Systems / B. Andersen. – Leipzig, 2011. – 45 p.
8. Минаков, А.А. Диагностирование оборудования с использованием параметров технологического контроля / А.А. Минаков, Д.В. Федосеев. // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2009. – С. 305 – 309.

## ІНФОРМАТИЗАЦІЯ ДИСТАНЦІЙНОГО ДІАГНОСТУВАННЯ СТАНУ СКЛАДНИХ ТЕХНІЧНИХ СИСТЕМ

С.Н. Коновалов, В.В. Вичужанін

Одеський національний морський університет,  
вул. Мечникова 34, Одеса, 65404, Україна; e-mail: vint532@yandex.ru

У статті наведені результати розробки та інформатизації методу дистанційного моніторингу, діагностики складних технічних систем, встановлених на судах. Проведено аналіз використовуваних методів моніторингу, діагностики технічних систем. Описано метод дистанційного моніторингу, діагностики, що ґрунтується на експертному аналізі стану складних технічних систем. Наведено результати розробки нечіткої моделі для діагностування складної технічної системи, а також результати її дослідження. Застосування розробленого методу і його інформатизація дозволяє оцінити працездатність складної технічної системи в різних умовах і режимах її експлуатації, а також прогнозувати стан системи в аварійних екстремальних ситуаціях.

**Ключові слова:** складна технічна система, моніторинг, діагностика, прогнозування, експертний аналіз, нечітка модель

## INFORMATIZATION OF THE CONTROLLED FROM DISTANCE DIAGNOSTICATING OF THE STATE OF THE DIFFICULT TECHNICAL SYSTEMS

S.N. Konovalov, V.V. Vychuzhanin

Odessa National Maritime University,  
34, Mechnikov str., Odessa, 65404, Ukraine; e-mail: vint532@yandex.ru

To the article the results of development and informatization of method of remote monitoring, diagnosticians of the difficult technical systems set on courts, are driven. The analysis of the used methods of monitoring, diagnostics of the technical systems is conducted. The method of remote monitoring diagnostics, being base on expert analysis of the state of the difficult technical systems, is described. Results over of development of unclear model are brought for diagnosticating of the difficult technical system, and also results of her research. Application of the worked out method and his informatization allow to estimate the capacity of the difficult technical system under various conditions and modes of her exploitation, and also to forecast the state of the system.

**Keywords:** difficult technical system, monitoring, diagnostics, forecasting, expert analysis, fuzzy model