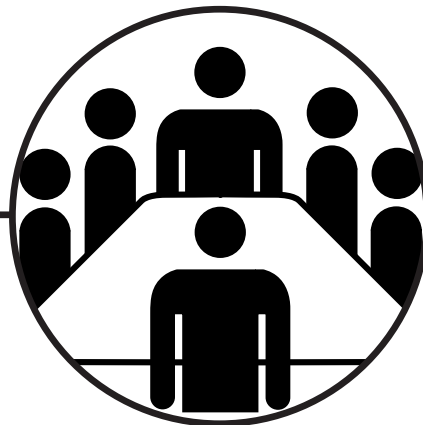




DOI 10.15589/jnn20160210
УДК 681.3.068
B94

FUZZY MODELS OF RISK EVALUATION OF COMPLEX TECHNICAL SYSTEMS AT THEIR MONITORING AND DIAGNOSTICS

НЕЧЕТКИЕ МОДЕЛИ ОЦЕНКИ РИСКОВ СЛОЖНЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ ПРИ ИХ МОНИТОРИНГЕ И ДИАГНОСТИКЕ

Volodymyr V. Vychuzhanin
vint532@yandex.ua
ORCID: 0000-0002-6302-1832

Natalia O. Shybaieva
nati081986@icloud.com
ORCID: 0000-0002-8986-6892

В. В. Вычужанин
д-р. техн. наук

Н. О. Шибаета
асист.

Odessa National Maritime University, Odessa

Одесский национальный морской университет, г. Одесса

Abstract. The article contains the results of researches Fuzzy models of estimation of risks of the difficult technical system and system of her remote monitoring and diagnostics in emergency situations. The algorithms of unclear inferencing and schematic structures Fuzzy models of estimation of risks of the difficult technical system and system of remote monitoring and diagnostics are worked out. The results of research of the worked Fuzzy model of estimation of risk of ship power plant allowed to estimate influence of probability of death subsystems and their elements of the difficult technical system, system of remote monitoring and diagnostics, damage on the general level of risk of complex of the difficult technical system and system of remote monitoring and diagnostics. The got results of developments and researches allow to promote efficiency of exploitation of the difficult technical system, provide quality prognostication of reliability of their functioning in an emergency.

Keywords: fuzzy models; difficult technical systems; remote monitoring; diagnostics; estimation of risks.

Аннотация. Приведены результаты исследований разработанных нечетких моделей оценки рисков взаимосвязанных и взаимодействующих подсистем и их элементов судовой сложной технической системы и системы ее дистанционного мониторинга и диагностики в аварийных ситуациях. Результаты исследования разработанных нечетких моделей оценки риска позволили оценить влияние вероятности выхода из строя сложной технической системы, системы дистанционного мониторинга и диагностики, ущерба на общий уровень риска комплекса сложной технической системы и системы дистанционного мониторинга и диагностики.

Ключевые слова: нечеткое моделирование; сложные технические системы; дистанционный мониторинг; диагностика; оценка рисков.

Анотація. Наведено результати досліджень розроблених нечітких моделей оцінки ризиків взаємозв'язаних і взаємодіючих підсистем і їхніх елементів судової складної технічної системи (СТС) і системи її дистанційного моніторингу й діагностики (ДМД) в аварійних ситуаціях. Результати дослідження розроблених нечітких моделей оцінки ризику дозволили оцінити вплив вірогідності виходу з ладу СТС, системи ДМД, збитку на загальний рівень ризику комплексу СТС і системи ДМД.

Ключові слова: нечітке моделювання; складні технічні системи; дистанційний моніторинг, діагностика; оцінка ризиків.

REFERENCES

- [1] Baklanov A. I. *Sistemy nablyudeniya i monitoringa* [Surveillance and monitoring systems]. Moscow, Binom Publ., 2009. 234 p.
- [2] Golovko S. V. *Diagnostika tekhnicheskogo sostoyaniya sudovogo elektrooborudovaniya na osnove intellektualnogo analiza dannykh* [Diagnostics of technical condition of the ship's electrical equipment based on data mining]. *Vestnik AGTU. Ser. : Upravlenie, vychislitel'naya tekhnika i informatika — Bulletin of ASTU. Ser. : Management, Computer Science and Informatics*, 2009, pp. 90–95.
- [3] Konchakov Ye. I. *Tekhnicheskaya diagnostika sudovykh energeticheskikh ustanovok* [Technical diagnostics of ship power plants]. Vladivostok, DVGUTU Publ., 2007. 112 p.
- [4] Minakov A. A., Fedoseev D. V. *Diagnostirovanie oborudovaniya s ispolzovaniem parametrov tekhnologicheskogo kontrolya* [Diagnosing the equipment using the process control parameters]. *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra Rossiyskoy akademii nauk — Proceedings of the Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*, 2009, pp. 305–309.
- [5] Ryabinin I. A. *Nadezhnost i bezopasnost strukturno-slozhnykh sistem* [Reliability and safety of structurally complicated systems]. Saint Petersburg, Izd-vo S.-Peterb. un-ta Publ., 2007. 276 p.
- [6] Andersen B. *A Diagnostic System for Remote Real-Time Monitoring of Marine Diesel-Electric Propulsion Systems*. Björn Andersen, Leipzig, 2011. 45 p.
- [7] Kertzner P., Watters J., Bodeau D. *Process Control System Security Technical Risk Assessment Methodology & Technical Implementation*. Research Report, 2008, no. 13. 47 p.
- [8] Klein J. H., Cork R. B. An approach to technical risk assessment. *International Journal of Project Management*, 1998, no. 16 (6), pp. 345–351.
- [9] O'Neill John, Nitin Thakur, Alan Duus. *Technical Risk Assessment: a Practitioner's Guide*. Australia, 2007. 29 p.

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ

В настоящее время решение одной из существенных народнохозяйственных задач заключается в повышении надежности судовых сложных технических систем (СТС), в частности судовых энергетических установок (СЭУ), напрямую связанной с безопасностью эксплуатации таких систем. Повышение эффективности использования судов и их технических систем способствует дальнейшему развитию научно-практических методов исследования надежности судовой техники. Только на основе оценки рисков и анализа надежности судовых СТС можно прогнозировать безопасность эксплуатации систем, разрабатывать мероприятия по повышению их долговечности и безотказности, обосновывать и планировать межремонтные периоды, нормативы расхода сменно-запасных частей и объемы ремонтов.

АНАЛИЗ ПОСЛЕДНИХ ДОСТИЖЕНИЙ И ПУБЛИКАЦИЙ

Для повышения эффективности эксплуатации судовых СТС применяются различные методы обеспечения надежности их функционирования, основанные на использовании данных, полученных сочетанием качественных и количественных методов оценок рисков [1–9]. Такой подход позволяет осуществить анализ рисков СТС при использовании меньшего объема информации и меньшей трудоемкости. Однако при автоматизации принятия решений по оценке рисков в аварийных сценариях экс-

плуатации систем возникают проблемы, связанные с неопределенностью, неполнотой и нечеткостью информации, сложностью учета и взаимодействия взаимосвязанных подсистем и их элементов, входящих в СТС.

Учитывая объективно существующую неопределенность, неполноту и нечеткость информации при оценке рисков СТС как сложных взаимосвязанных и взаимодействующих комплексов подсистем и их элементов, а также неопределенность, неполноту и нечеткость информации, получаемой системами ДМД технического состояния систем, целесообразно использовать аппарат нечеткой логики, в том числе нечеткие модели оценки рисков взаимосвязанных и взаимодействующих СТС и систем ДМД. Для построения нечетких моделей оценки риска взаимосвязанных и взаимодействующих СТС и систем ДМД в качестве входных параметров могут быть использованы вероятности выхода из строя подсистем и их элементов, а также ущерб от последствий рискованного события при аварийных сценариях эксплуатации СТС и систем ДМД.

ЦЕЛЬ СТАТЬИ — разработка и исследование нечетких моделей оценки рисков СТС и систем ДМД в аварийных сценариях с учетом взаимосвязанных и взаимодействующих их подсистем и элементов.

ИЗЛОЖЕНИЕ ОСНОВНОГО МАТЕРИАЛА

Для решения поставленной задачи предложена иерархическая структура модели оценки рисков СТС

и систем ДМД (рис. 1), позволяющая преодолеть разнотой в размерностях, а именно экспоненциальный характер зависимости количества входных параметров от количества задействованных правил. Иерархическая модель состоит из нечетких моделей подсистем и элементов СТС и системы ДМД меньших размерностей. Выходы модели верхнего уровня являются входами модели нижнего уровня, поэтому существенно уменьшается количество правил. На приведенной рис. 1 структурной схеме иерархической модели FLU (Fuzzy Local Unit) показаны нечеткологические модули.

При проведении исследований предлагается использовать разнообразные модели нечеткого логического вывода, различаемые структурой консеквента. В качестве нечетких моделей используются модели Такаги-Сугено, к преимуществам которых относятся более компактный размер репозитория правил по сравнению с моделями нечеткого логического вывода Мамдани, а также меньшая вычислительная сложность за счет более простой процедуры дефазификации. Антецедент в такой модели характеризует нечеткие области в пространстве входных значений, в которых функции консеквента проходят валидацию.

Риск исследуемого объекта можно представить в виде

$$R = \{ \langle P_i, Y_i, q_i \rangle \}, i = 1, 2, \dots, N,$$

где P_i — вероятность риска выхода из строя элемента СТС и системы ДМД; Y_i — ущерб от последствий

рискового события; q_i — вес i -го риска, устанавливается для каждого риска в пределах $0 \dots 1$ при выполнении

$$\sum_{j=1}^{n_i} q_{ji} = 1 (i = 1, \bar{N}) \text{ и } \sum_{i=1}^N q_i = 1.$$

Суммарная количественная оценка риска СТС и системы ДМД с учетом оценки рисков подсистем и элементов определяется

$$R = \sum_{i=1}^N R_i \cdot q_i,$$

где R_i — количественная оценка i -го вида риска.

Нечеткое подмножество для выходной переменной с функцией принадлежности можно представить в виде

$$\begin{aligned} \mu_{\Sigma}(Y_R) &= \mu_{x_i}(Y_{R_i}, q_i) = \\ &= \max_{Y_R} [\mu_{xP_i}(Y_R), \mu_{xY_i}(Y_R), \mu_{xq_i}(Y_R)], \end{aligned}$$

где $\mu_{\Sigma}(Y_R)$ — итоговое нечеткое подмножество для выходной переменной риска (Y_R); $\mu_{x_i}(Y_{R_i}, q_i)$ — нечеткое множество, входящее в состав подмножества $\mu_{\Sigma}(Y_R)$; $\mu_{xP_i}(Y_R)$ — нечеткое множество вероятностей выхода из строя подсистем и элементов СТС; $\mu_{xY_i}(Y_R)$ — нечеткое множество ущербов подсистем и элементов СТС; $\mu_{xq_i}(Y_R)$ — нечеткое множество весов рисков подсистем и элементов СТС.

Построение разработанных нечетких моделей оценки рисков подсистем и элементов, на примере СЭУ проводилось с помощью пакета прикладных про-

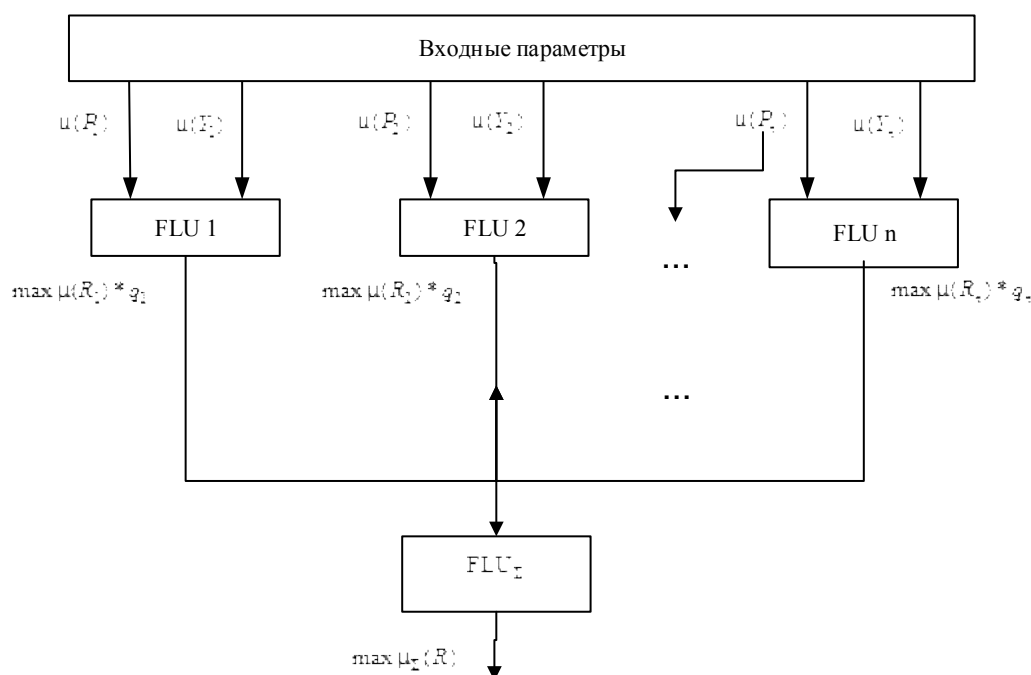


Рис. 1. Структурная схема иерархической модели подсистем и элементов СТС и системы ДМД

грамм Matlab, графических средств и инструментов пакета расширения Matlab — Fuzzy Logic Toolbox. Основа в расчетах функция распределения Гаусса в качестве функции принадлежности, реализуемая в Matlab в виде gaussmf для задания гладких симметричных функций принадлежности. На этапе фаззификации задаются входные переменные нечетких моделей оценки рисков в виде вероятностей выхода из строя и ущербов от последствий рисков событий элементов СЭУ.

Используемые функции принадлежности лингвистических термов нечетких моделей масляной, топливной подсистем СЭУ, а также системы ДМД отобраны в табл. 1 и представлены на рис. 2.

В предложенных нечетко-вероятностных подмоделях используются вероятностные нечеткие правила Такаги-Сугено нулевого порядка. Нечеткие правила имеют следующую структуру:

If ущерб от вероятность then риск,
где ущерб и вероятность — это лингвистическое значение антецедента, определяемое нечеткой функцией принадлежности, представляющее собой стохастическую переменную консеквента, равную одному из значений диапазона от 0 до 1.

Выбор значения консеквента производится в соответствии с условными вероятностями. Использование формы «если — то» и функций принадлежности для соответствующих логических термов обеспечило формирование базы правил, используемой на основании нечетких продукций. База правил для суммарных рисков содержит 25 логических правил (табл. 2). Фрагмент базы логических правил нечеткой модели в виде нечетких продукций в RuleEditor приведен на рис. 3.

Таблица 1. Лингвистические переменные и их функции принадлежности для подсистем СЭУ, системы ДМД

Название подсистемы	Название лингвистической переменной	Символьный вид переменной	Область определения функции принадлежности
Масляная подсистема	Ущерб	Незначительный	0,24–0,35
		Низкий	0,3–0,53
		Средний	0,5–0,73
		Высокий	0,69–0,92
		Критический	0,85–1
	Вероятность	Незначительная	0,17–0,35
		Низкая	0,3–0,52
		Средняя	0,47–0,74
		Высокая	0,7–0,9
		Критическая	0,85–0,98
Топливная подсистема	Ущерб	Незначительный	0,023–0,24
		Низкий	0,2–0,45
		Средний	0,4–0,7
		Высокий	0,65–0,9
		Критический	0,85–0,97
	Вероятность	Незначительная	0,0097–0,15
		Низкая	0,11–0,3
		Средняя	0,23–0,5
		Высокая	0,43–0,6
		Критическая	0,55–0,67
ДМД	Ущерб	Незначительный	0,012–0,05
		Низкий	0,04–0,08
		Средний	0,07–0,12
		Высокий	0,11–0,16
		Критический	0,15–0,18
	Вероятность	Незначительная	0,01–0,03
		Низкая	0,02–0,05
		Средняя	0,04–0,08
		Высокая	0,07–0,11
		Критическая	0,1–0,12

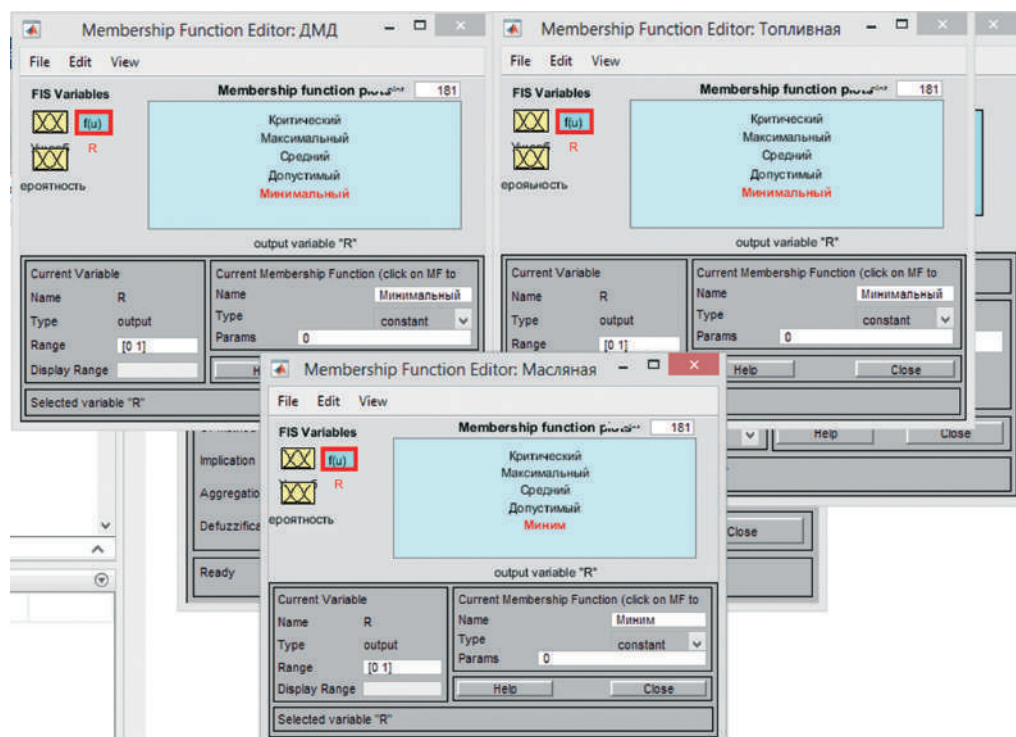


Рис. 2. Функции допустимой принадлежности для лингвистического термина «риск» масляной, топливной подсистем СЭУ и системы ДМД

Таблица 2. База правил нечетких продукций для суммарных рисков

№	Риск масляной подсистемы	Риск топливной подсистемы	Риск ДМД	Общий риск
1	Минимальный	Минимальный	Минимальный	Минимальный
2	Минимальный	Минимальный	Допустимый	Минимальный
3	Минимальный	Минимальный	Средний	Допустимый
4	Минимальный	Минимальный	Максимальный	Допустимый
5	Минимальный	Минимальный	Критический	Максимальный
6	Минимальный	Допустимый	Минимальный	Минимальный
7	Минимальный	Средний	Минимальный	Допустимый
8	Минимальный	Максимальный	Минимальный	Средний
9	Минимальный	Критический	Минимальный	Максимальный
10	Минимальный	Максимальный	Минимальный	Минимальный
11	Средний	Минимальный	Минимальный	Допустимый
12	Максимальный	Минимальный	Минимальный	Средний
13	Критический	Минимальный	Минимальный	Максимальный
14	Допустимый	Допустимый	Допустимый	Допустимый
15	Допустимый	Средний	Средний	Средний
16	Допустимый	Максимальный	Максимальный	Максимальный
17	Допустимый	Критический	Критический	Критический
18	Средний	Минимальный	Минимальный	Допустимый
19	Средний	Допустимый	Допустимый	Допустимый
20	Средний	Средний	Средний	Средний
21	Средний	Максимальный	Максимальный	Максимальный
22	Средний	Критический	Критический	Критический
23	Максимальный	Максимальный	Максимальный	Критический
24	Максимальный	Критический	Критический	Критический
25	Критический	Критический	Критический	Критический

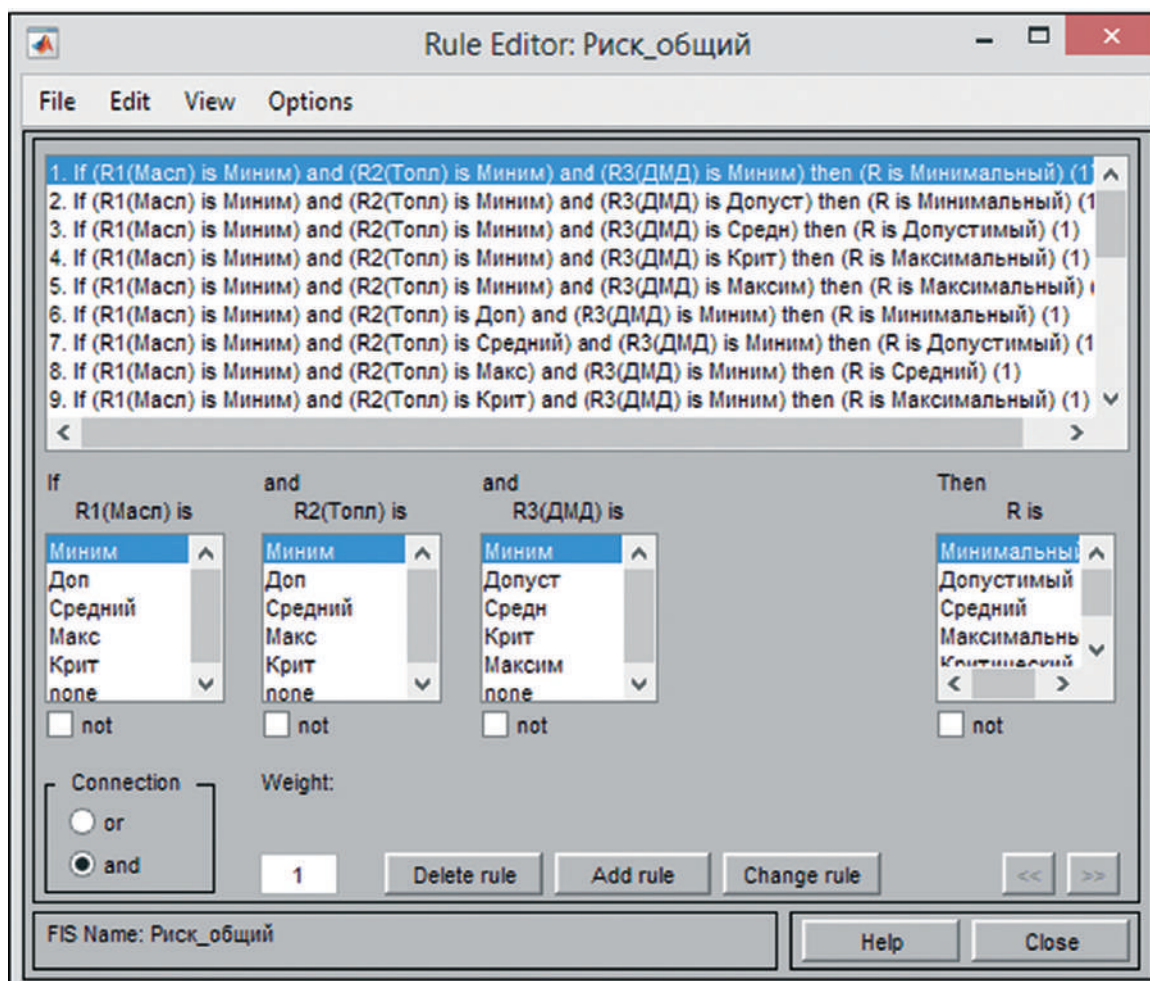


Рис. 3. Фрагмент базы логических правил нечетких моделей суммарной оценки рисков для масляной, топливной подсистем СЭУ и системы ДМД

Моделированием получена трехмерная визуализация поверхностей моделей оценок рисков подсистем и элементов СТС, системы ДМД (рис. 4), которая может быть использована для моделирования и формализации представления критериев рисков исследуемых объектов. Разработанные нечеткие модели позволяют получить значения рисков для каждой точки, принадлежащей трехмерной поверхности, а также отражают качественные переходы между значениями параметров в виде «впадин» и «всплесков».

При помощи GUI-модуля Rule Viewer пакета Fuzzy Logic Toolbox осуществлена визуализация (рис. 5), позволяющая проиллюстрировать ход логического вывода по каждому отдельному правилу при учете входных переменных «Ущерб» и «Вероятность», а также получение нечеткого множества и выполнение процедуры дефазификации рисков подсистем и элементов СТС, системы ДМД.

Используя Fuzzy Logic Controller в Simulink (рис. 6) осуществлено дополнительное моделирование

подсистем и элементов СТС, системы ДМД для входных переменных «Ущерб» и «Вероятность» в целях вычисления суммарных значений рисков комплекса (рис. 7).

Из результатов исследований следует, что наибольший рост суммарного уровня риска подсистем и элементов СТС, системы ДМД наблюдается при значениях вероятностей выхода из строя в диапазоне 0,455...1. При значениях ущерба, например, для СЭУ, равного 0,234, и вероятности выхода из строя, равной 0,5, значение выходной переменной риска составило 0,157, т. е. порядка 16%. Такие данные свидетельствуют о том, что имеет место невысокая степень опасности нарушения работоспособности системы. Сравнение результатов нечеткого вывода различных значений входных переменных, полученных на основе расчетов, с помощью нечетких моделей в MATLAB, показывает хорошую согласованность моделей и подтверждает их адекватность при оценках рисков подсистем и элементов СТС, системы ДМД.

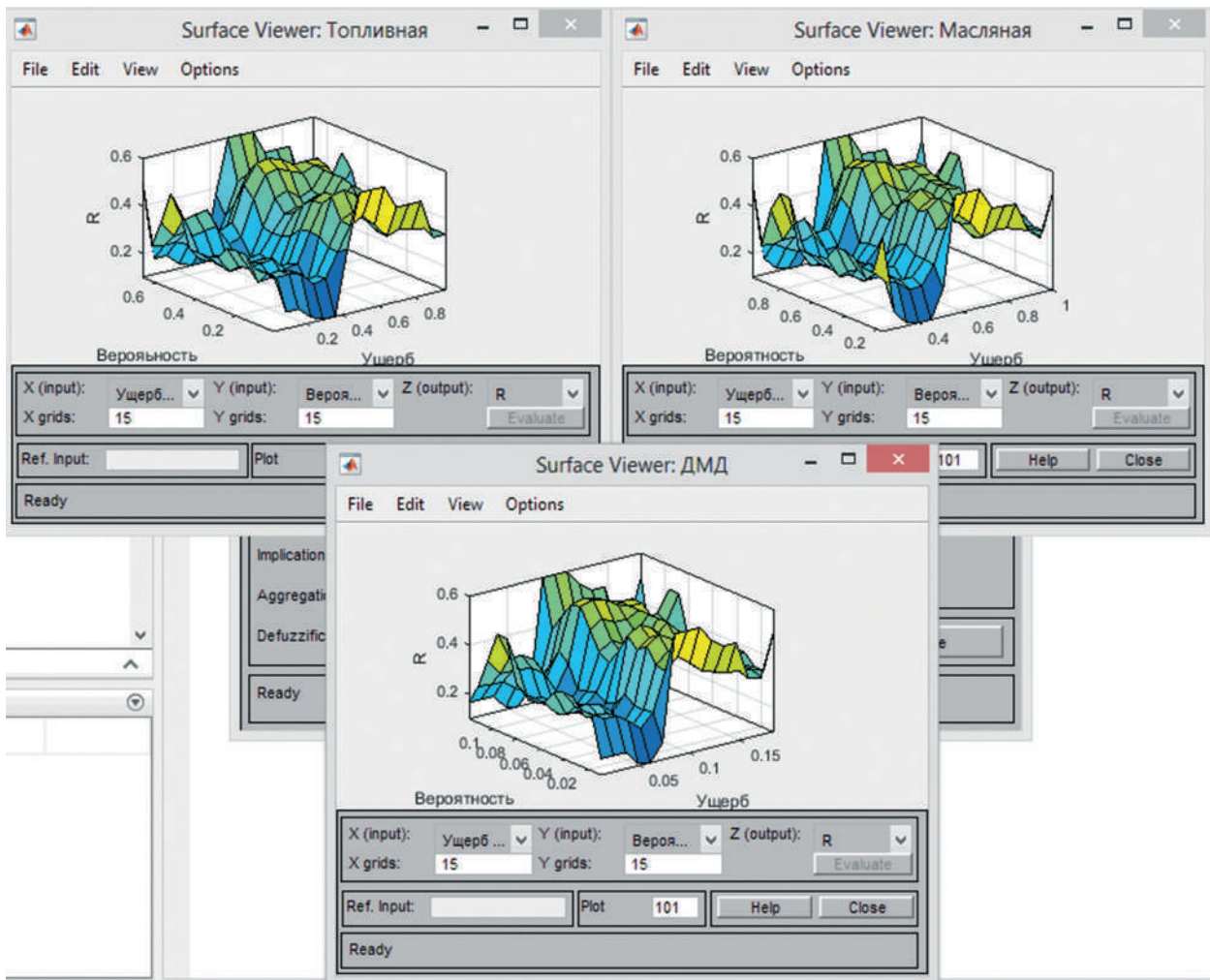


Рис. 4. Трехмерная визуализация поверхностей нечетких моделей оценки рисков подсистем и элементов СТС, системы ДМД

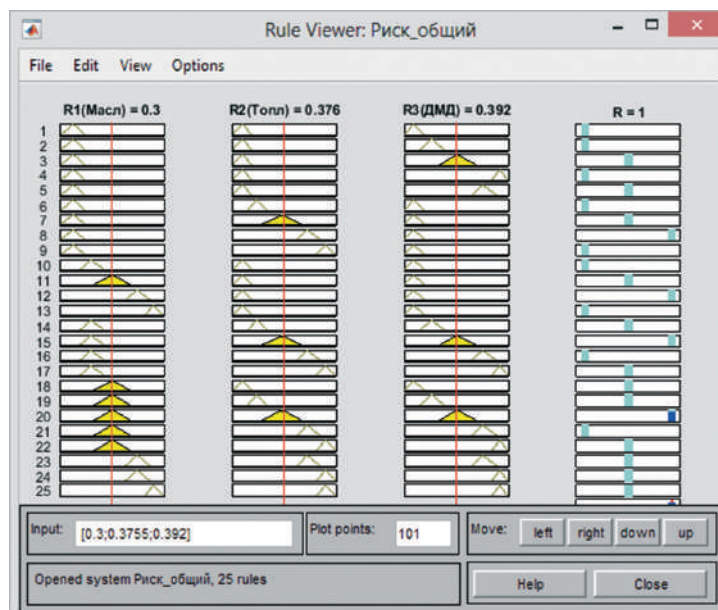


Рис. 5. Визуализированное представлений правил нечетких моделей оценки логических уровней суммарных рисков подсистем и элементов СТС, системы ДМД

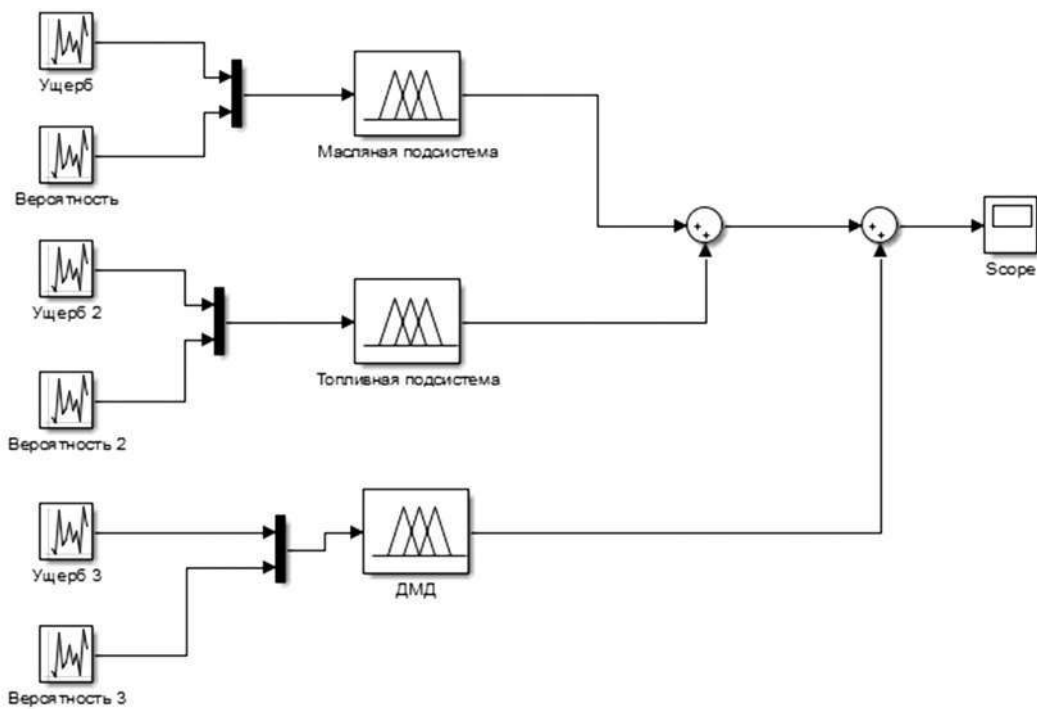


Рис. 6. Схема расчета суммарного риска подсистем и элементов ЦТС, системы ДМД в Simulink Matlab

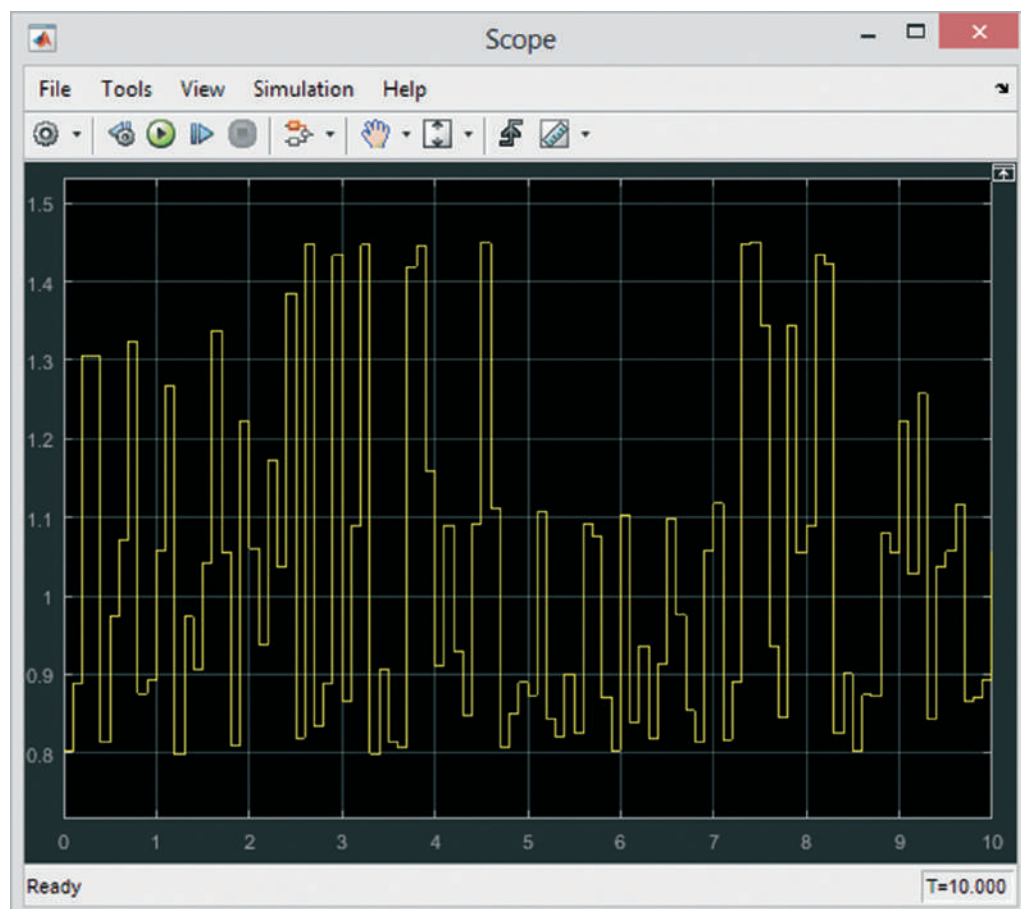


Рис. 7. Изменения значений суммарного риска подсистем и элементов ЦТС, системы ДМД в Simulink Matlab

ВЫВОДЫ. Применение разработанных нечетких моделей оценки рисков СТС и системы ДМД с учетом вариационной информации об оценках рисков в различных сценариях изменений вероятностей и ущербов выхода из строя подсистем и их элементов СТС системы ДМД обеспечивает исследование моделей систем в аварийных сценариях с учетом взаимосвязанных и взаимодействующих их подсистем и элементов.

Разработанная нечетко-вероятностная модель оценки рисков позволяет исследовать и анализиро-

вать многочисленные отношения механизмов неопределенностей и сценариев развития рисков с учетом структуры СТС и системы ДМД при минимизации времени на расчет.

Применение разработанных нечетких моделей оценки рисков подсистем и их элементов СТС системы ДМД с учетом вариационной информации об оценках рисков в различных сценариях изменений ущербов и вероятностей выхода из строя элементов систем позволит повысить уровень качества проектных работ.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] **Бакланов, А. И.** Системы наблюдения и мониторинга [Текст] / А. И. Бакланов. — М : Бином, 2009. — 234 с.
- [2] **Головко, С. В.** Диагностика технического состояния судового электрооборудования на основе интеллектуального анализа данных [Текст] / С. В. Головко. // Вестник АГТУ. Сер. : Управление, вычислительная техника и информатика, 2009. — С. 90–95.
- [3] **Кончаков, Е. И.** Техническая диагностика судовых энергетических установок [Текст] / Е. И. Кончаков. — Владивосток : ДВГТУ, 2007. — 112 с.
- [4] **Минаков, А. А.** Диагностирование оборудования с использованием параметров технологического контроля [Текст] / А. А. Минаков, Д. В. Федосеев. // Известия Самарского научного центра Российской академии наук, 2009. — С. 305–309.
- [5] **Рябинин, И. А.** Надежность и безопасность структурно-сложных систем [Текст] / И. А. Рябинин. — СПб. : Изд-во С.-Петерб. ун-та, 2007. — 276 с.
- [6] **Andersen, B.** A Diagnostic System for Remote Real-Time Monitoring of Marine Diesel-Electric Propulsion Systems [Text] / Björn Andersen — Leipzig, 2011. — 45 p.
- [7] **Kertzner, P.** Process Control System Security Technical Risk Assessment Methodology & Technical Implementation [Text] / P. Kertzner, J. Watters, D. Bodeau // Research Report. — 2008. — № 13. — 47 p.
- [8] **Klein, J. H.** An approach to technical risk assessment [Text] / J. H. Klein, R. B. Cork // International Journal of Project Management. — 1998. — 16 (6). — Pp. 345–351
- [9] **O'Neill John** Technical Risk Assessment: a Practitioner's Guide [Text] / John O'Neill, Nitin Thakur, Alan Duus. — Australia, 2007. — 29 p.

© В. В. Вичужанін, Н. О. Шибасва
Надійшла до редколегії 13.04.2016
Статтю рекомендує до друку
д-р техн. наук, проф. В. П. Сторожев