

## НЕЧЕТКО-ВЕРОЯТНОСТНАЯ МОДЕЛЬ ОЦЕНОК РИСКОВ СЛОЖНЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Н.Д. Рудниченко, В.В. Вычужанин

Одесский национальный морской университет,  
Мечникова 34, Одесса, 65029, Украина, e-mail: murder8910@mail.ru

В статье приведены результаты исследований разработанной нечетко-вероятностной модели оценок рисков сложных технических систем. Разработаны алгоритм нечеткого логического вывода и схематическая структура нечетко-вероятностной модели оценок рисков сложных технических систем. Сформирована база правил нечетких продукций для предложенных лингвистических переменных нечетко-вероятностной модели оценок рисков. На основании полученных результатов исследований построена трехмерная визуализация поверхности нечетко-вероятностной модели оценки структурного и функционального риска элементов и межэлементных связей судовой энергетической установки. Результаты исследования разработанной нечетко-вероятностной модели оценки риска судовой энергетической установки позволили оценить влияние ущерба и вероятности выхода из строя элементов и межэлементных связей на общий уровень риска судовой энергетической установки. Полученные результаты исследований и разработок позволяют повысить эффективность эксплуатации сложных технических систем, обеспечить качественное прогнозирование надежности их функционирования в аварийных экстремальных ситуациях.

**Ключевые слова:** нечеткое моделирование, сложные технические системы, оценка рисков, нечеткая логика, нечетко-вероятностная модель.

### Введение

Многообразие методов оценки рисков сложных технических систем (СТС) базируется на инженерных, модельных, экспертных и других подходах [1, 2 – 4]. Подобные методы связаны со сложными расчетами, определяющими значения оценок рисков с точностью не выше первого порядка. В работах [3, 5 - 7] для обеспечения безопасности СТС рекомендуется пользоваться данными, полученными сочетанием качественных и количественных методов оценок рисков. Это позволяет осуществить анализ рисков СТС при использовании меньшего объема информации и затрат труда. Однако авторы оценки рисков СТС для автоматизации принятия решений в аварийных сценариях осуществляют без подхода, основанного на учете взаимосвязанности и взаимодействия их структурных компонентов, состоящих из элементов и межэлементных связей (МС). Учитывая объективно существующую неопределенность, неполноту и нечеткость информации при оценке рисков СТС как сложных комплексов функционально взаимосвязанных структурных компонентов, целесообразно использовать аппарат нечеткой логики, в том числе нечетко-вероятностную модель оценки риска СТС. Для построения нечетко-вероятностной модели оценки риска СТС в качестве входных параметров могут быть использованы ущерб при аварийных сценариях и их вероятность.

## Цель статьи и постановка задачи исследований

Целью работы является исследование нечетко-вероятностной модели оценок рисков сложных технических систем в аварийных сценариях с учетом взаимосвязанности и взаимодействия их элементов и межэлементных связей.

Для достижения поставленной цели необходимо разработать нечетко-вероятностную модель оценок рисков сложных технических систем.

## Основная часть

Построение нечетко-вероятностной модели оценки структурного риска элементов и межэлементных связей СТС осуществлено с помощью пакета прикладных программ Matlab, графических средств и инструментов пакета расширения Matlab – Fuzzy Logic Toolbox [8]. Оценка рисков на основе нечеткой логики проводилась в соответствии с алгоритмом нечеткого логического вывода по базе правил Мамдани, представляющего собой композицию с использованием операции максимум (max). Это позволяет получить итоговое нечеткое подмножество для выходной переменной с функцией принадлежности вида (1)

$$\mu_{\Sigma}(y_R) = \mu_{x_i}(y_R) = \max_{y_R} [\mu_{x_{P_i}}(y_R), \mu_{x_{Y_i}}(y_R)], \quad (1)$$

где  $\mu_{\Sigma}(y_R)$  – итоговое нечеткое подмножество для выходной переменной риска ( $y_R$ );

$\mu_{x_i}(y_R)$  – нечеткие множества, входящие в состав подмножества  $\mu_{\Sigma}(y_R)$ ;

$\mu_{x_{P_i}}(y_R)$  – нечеткое множество вероятностей выхода из строя элементов и МС СЭУ;

$\mu_{x_{Y_i}}(y_R)$  – нечеткое множество ущербов элементов и МС СЭУ.

Ввод продукционных правил осуществлялся на основании обобщенной функции желательности Харрингтона для разработанного метода оценок рисков [9]. В качестве функции принадлежности использовалась функция распределения Гаусса, реализованная в Matlab в виде `gaussmf` для задания гладких симметричных функций принадлежности. На этапе фазификации задавались входные переменные нечетко-вероятностной модели оценки риска СТС в виде вероятностей выхода из строя и ущербов их по элементам и МС. Значения функций принадлежности по лингвистическим термам приведены в таблице 1.

Реализация операции агрегирования основывалась на методе максимизации, реализованном в Matlab в виде `max`. При активизации заключений весовые значения для всех входных переменных нечетко-вероятностной модели были приняты равными единице. При аккумуляции для объединения всех степеней истинности заключений правил использовался метод `max`-дизъюнкции. Формирование базы правил проводилось на основании нечетких продукций в форме «если–то» и функций принадлежности для соответствующих логических термов. Разработанная нечетко-вероятностная модель оценки рисков СТС, на примере судовой энергетической установки (СЭУ) с учетом [10] содержит 25 логических правил (таблица 2). Фрагмент базы логических правил нечетко-вероятностной модели оценки структурного и функционального рисков элементов и МС СЭУ в виде нечетких продукций в Rule Editor приведен на рис. 1.

Таблица 1.

Лингвистические переменные и их функции принадлежности

Название лингвистической переменной	Термы переменной (символьный вид)	Область определения функции принадлежности
Ущерб ( <i>Y</i> )	Незначительный	$x, 0, 0.25$
	Низкий	$x, 0.125, 0.38$
	Средний	$x, 0.25, 0.65$
	Высокий	$x, 0.55, 0.82$
	Критический	$x, 0.75, 1$
Вероятность выхода из строя ( <i>P</i> )	Незначительная	$x, 0, 0.15$
	Низкая	$x, 0.1, 0.35$
	Средняя	$x, 0.25, 0.6$
	Высокая	$x, 0.45, 0.75$
	Критическая	$x, 0.6, 1$
Риск ( <i>R</i> )	Минимальный	$y, 0, 0.25$
	Допустимый	$y, 0.125, 0.38$
	Максимальный	$y, 0.25, 0.65$
	Критический	$y, 0.75, 1$

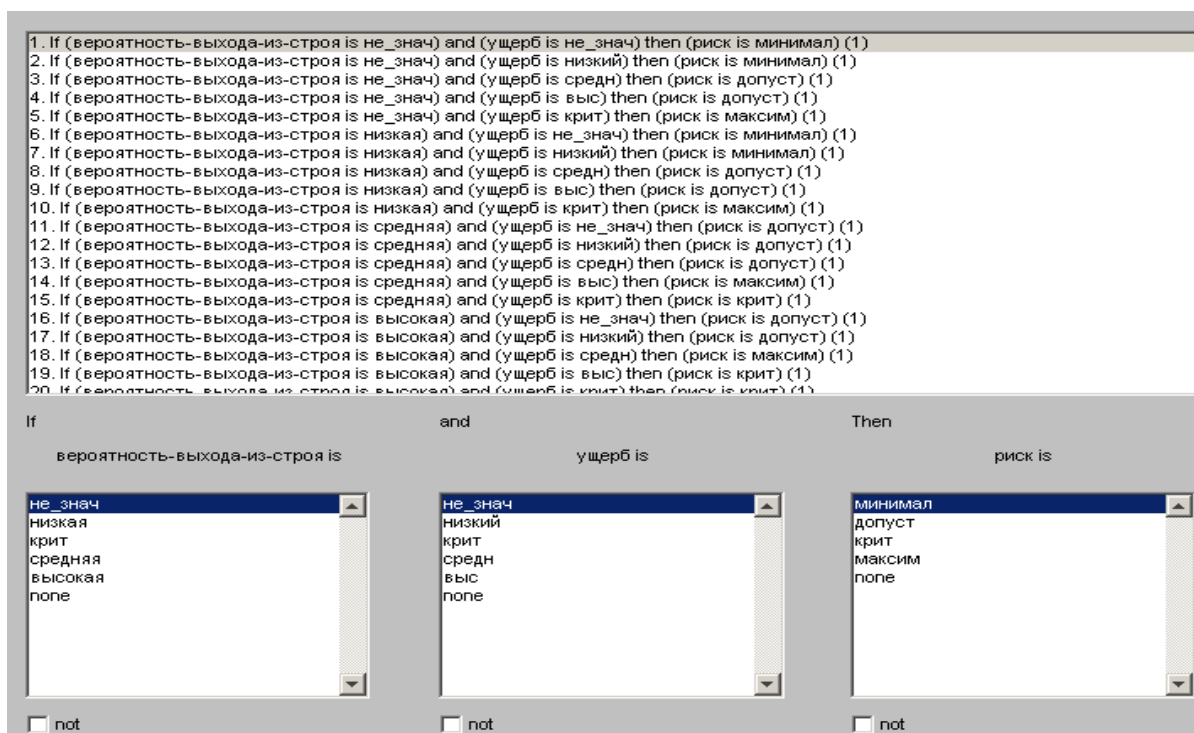


Рис 1. Фрагмент базы логических правил нечетко-вероятностной модели

Таблица 2.

База правил нечетких продукций

Имя переменной	Номер правила			
	1	2	3	4
$x_P$	незначительная	незначительная	незначительная	незначительная
$x_Y$	незначительный	незначительный	средний	высокий
$y_R$	минимальный	минимальный	допустимый	допустимый
Имя переменной	Номер правила			
	5	6	7	8
$x_P$	незначительная	низкая	низкая	низкая
$x_Y$	критический	незначительный	низкий	средний
$y_R$	максимальный	минимальный	минимальный	допустимый
Имя переменной	Номер правила			
	9	10	11	12
$x_P$	низкая	низкая	средняя	средняя
$x_Y$	высокий	критический	незначительный	низкий
$y_R$	допустимый	максимальный	допустимый	допустимый
Имя переменной	Номер правила			
	13	14	15	16
$x_P$	средняя	средняя	средняя	высокая
$x_Y$	средний	высокий	критический	незначительный
$y_R$	максимальный	максимальный	критический	допустимый
Имя переменной	Номер правила			
	17	18	19	20
$x_P$	высокая	высокая	высокая	высокая
$x_Y$	низкий	средний	высокий	критический
$y_R$	допустимый	максимальный	критический	критический
Имя переменной	Номер правила			
	21	22	23	24
$x_P$	критическая	критическая	критическая	критическая
$x_Y$	незначительный	низкий	средний	высокий
$y_R$	максимальный	максимальный	критический	критический
Имя переменной	Номер правила			
	25			
$x_P$	критическая			
$x_Y$	критический			
$y_R$	критический			

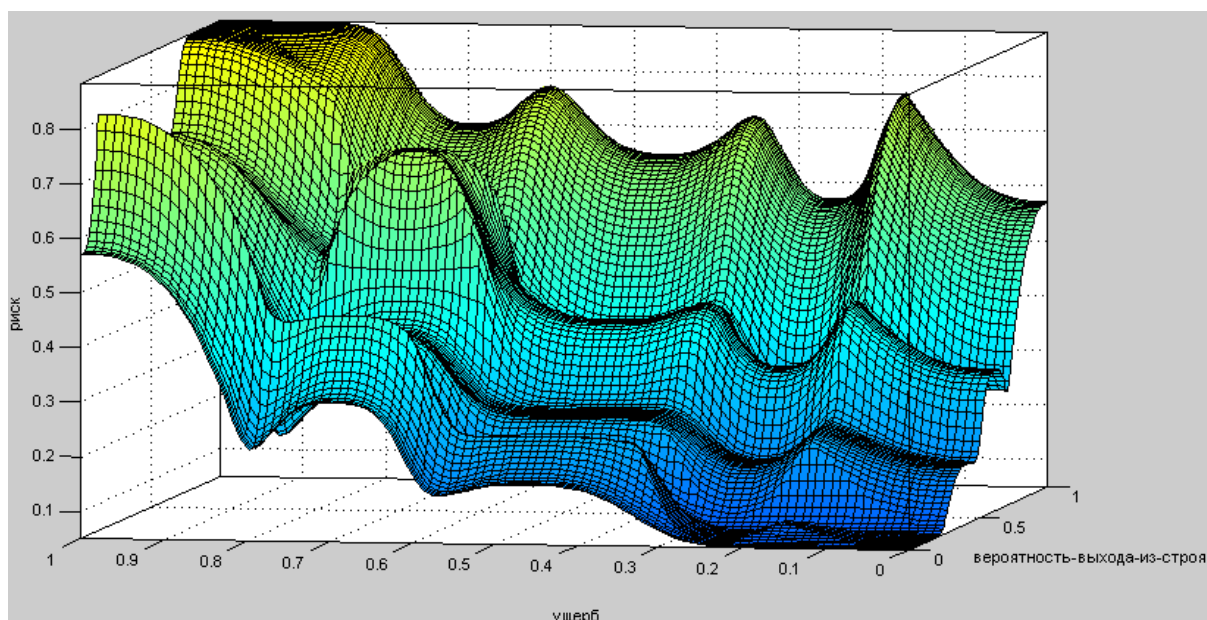
Дефазификация проведена с помощью реализованного в Matlab метода центра тяжести согласно (2).

$$\bar{y}_R = \int_{\min}^{\max} y_R \cdot \mu(y_R) dy_R, \int_{\min}^{\max} \mu(y_R) dy_R, \quad (2)$$

где  $\overline{y_R}$  – результат дефазификации;  $y_R$  – переменная, соответствующая выходной лингвистической переменной  $R$ ;  $\mu(y_R)$  – функция принадлежности нечеткого множества, соответствующего выходной переменной  $R$  после этапа аккумуляции;  $\min$  и  $\max$  – левая и правая точки интервала носителя нечеткого множества рассматриваемой выходной переменной  $R$ .

Ущерб для элементов и МС СЭУ задавался с использованием лингвистических переменных «Незначительный» (0-0.25), «Низкий» (0.12-0.36), «Средний» (0.3-0.6), «Высокий» (0.55-0.8), «Критический» (0.7-1). Вероятность выхода из строя элементов и МС СЭУ задавалась с использованием лингвистических переменных «Незначительная» (0-0.15), «Низкая» (0.1-0.31), «Средняя» (0.22-0.6), «Высокая» (0.45-0.75), «Критическая» (0.6-1). В качестве лингвистических переменных при построении нечетко-вероятностной модели оценки структурного риска элементов и МС СЭУ использовались термины «Минимальный риск» (0-0.2), «Допустимый риск» (0.1-0.35), «Значительный риск» (0.3-0.65), «Критический риск» (0.63-1).

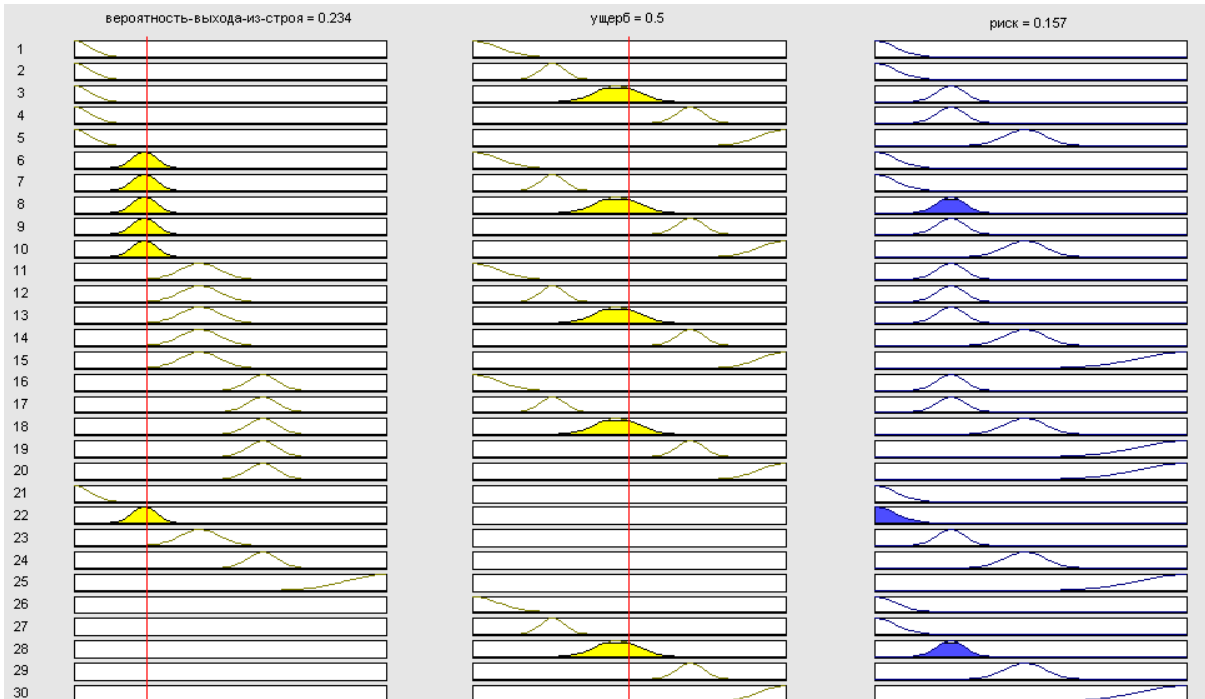
Для моделирования и формализации представления критериев риска СЭУ получена трехмерная визуализация поверхности разработанной нечетко-вероятностной модели оценки риска элементов и МС СЭУ (рис. 2).



**Рис 2.** Трехмерная визуализация поверхности нечетко-вероятностной модели оценки структурного и функционального риска элементов и МС СЭУ

На оси абсцисс отложены значения вероятностей выхода из строя элементов и МС СЭУ, на оси ординат – значения рисков элементов и МС СЭУ, ось аппликат содержит значения рисков элементов и МС СЭУ. Разработанная нечетко-вероятностная модель позволяет получить значения рисков для каждой точки, принадлежащей трехмерной поверхности, а также отражает качественные переходы между значениями параметров в виде «впадин» и «всплесков».

Визуализация нечеткого логического вывода правил нечетко-вероятностной модели оценки структурного и функционального риска элементов и МС СЭУ приведена на рис. 3.



**Рис. 3.** Правила нечетко-вероятностной модели оценок рисков СЭУ

Визуализация осуществлена с помощью GUI-модуля Rule Viewer пакета Fuzzy Logic Toolbox, позволяющего проиллюстрировать ход логического вывода по каждому правилу, получение результирующего нечеткого множества и выполнение процедуры дефазификации функционального риска элементов и МС СЭУ.

Проверка разработанной нечетко-вероятностной модели оценки структурного и функционального риска элементов и МС СЭУ с помощью задания различных правил (рис.3) была выполнена для ряда значений входных и выходных переменных. В частности, при значениях ущерба 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 СЭУ. Согласно полученной трехмерной визуализации поверхности нечетко-вероятностной модели оценки наибольший рост уровня риска СЭУ наблюдается при значениях вероятности выхода из строя в диапазоне 0.5... 1.

## Выводы

Применение разработанной нечетко-вероятностной модели оценки рисков проектируемых и эксплуатируемых СТС с учетом вариационной информации об оценках рисков в различных сценариях изменений ущербов и вероятностей выхода из строя элементов и МС СТС обеспечивает исследование моделей систем в аварийных сценариях с учетом взаимосвязанности и взаимодействия их элементов и межэлементных связей.

**Список литературы**

1. Рябинин, И. А. Надежность и безопасность структурно-сложных систем / И. А. Рябинин. – СПб.: Изд-во С.-Петербург. ун-та, 2007. – 276 с.
2. Klein, J. H. An approach to technical risk assessment / J. H. Klein, R. B. Cork // *International Journal of Project Management*. – 1998. – 16 (6). – P. 345-351
3. Rausand, M. *System Reliability Theory: Models, Statistical Methods, and Applications*, Second Edition / M. Rausand, A. Hoyland. – Wiley-Interscience, 2003. – 351 p.
4. Covello, V. T. *Risk Assessment Methods. Approaches for Assessing Health and Environmental Risks* / V. T. Covello, M. W. Merkhofer. – Plenum Press, New York and London, 1993. – 319 p.
5. O'Neill, John. *Technical Risk Assessment: a Practitioner's Guide* / John O'Neill, Nitin Thakur, Alan Duus. – Australia, 2007. – 29 p.
6. Henley Ernest, J. *Reliability engineering and risk assessment*. / J. Ernest Henley, Hiromitsu Kumamoto. – New York : IEEE Press, Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, N.J. - 1992. – 568 p.
7. Kertzner, P. *Process Control System Security Technical Risk Assessment Methodology & Technical Implementation* / P. Kertzner, J. Watters, D. Bodeau // *Research Report*. – 2008. – № 13. – 47 p.
8. Леоненков, А. *Нечеткое моделирование в среде MATLAB и fuzzyTECH*. – СПб.: БХВ-Петербург, 2005. – 736 с.
9. Рудниченко, Н. Информационная когнитивная модель технологической взаимозависимости сложных технических систем / Н. Д. Рудниченко, В. В. Вычужанин // *Информатика и математические методы в моделировании*. – 2013. – №3. – С. 240-247.
10. Покусаев, М.Н. Система диагностики судовых энергетических установок с применением нейросетевых моделей / М.Н. Покусаев, Н.Н. Касимов // *Вестник АГТУ, Управление вычислительная техника и информатика*. – 2012. – №2. – С. 88-92.

## НЕЧІТКО-ЙМОВІРНІСНА МОДЕЛЬ ОЦІНОК РИЗИКІВ СКЛАДНИХ ТЕХНІЧНИХ СИСТЕМ

Н.Д. Рудніченко, В.В. Вичужанин

Одеський національний морський університет,  
Мечникова 34, Одеса, 65404, Україна, e-mail: murder8910@mail.ru

У статті наведено результати досліджень розробленої нечітко - імовірнісної моделі оцінок ризиків складних технічних систем. Розроблено алгоритм нечіткого логічного висновку і схематичну структуру нечітко - імовірнісної моделі оцінок ризиків складних технічних систем. Сформовано базу правил нечітких продукцій для запропонованих лінгвістичних змінних нечітко - імовірнісної моделі оцінок ризиків. На підставі отриманих результатів досліджень побудована тривимірна візуалізація поверхні нечітко - імовірнісної моделі оцінки структурного та функціонального ризику елементів і міжелементних зв'язків складної технічної системи. Результати дослідження розробленої нечітко - імовірнісної моделі оцінки ризику складної технічної системи дозволили оцінити вплив збитку і ймовірності виходу з ладу елементів і міжелементних зв'язків на загальний рівень ризику складної технічної системи. Отримані результати досліджень і розробок дозволяють підвищити ефективність експлуатації складних технічних систем, забезпечити якісне прогнозування надійності їх функціонування у різних сценаріях розвитку аварійних ситуацій.

**Ключові слова:** нечітке моделювання, складні технічні системи, оцінка ризиків, нечітка логіка, нечітко - імовірнісна модель.

## FUZZY-PROBABILITY MODEL FOR ASSESSING THE RISKS IN COMPLEX TECHNICAL SYSTEMS

N.D. Rudnichenko, V.V. Vychuzhanin

Odesa National Marine University,  
34 Mechnikov Str., 65404, Ukraine; e-mail: murder8910@mail.ru

In this paper, the authors present the results of their research of a fuzzy-probability model developed for assessing the risks in complex technical systems. A fuzzy inference algorithm and a schematic structure for the fuzzy-probability model assessing the risks in complex technical systems were developed. A fuzzy production rulebase was formed for the linguistic variables proposed for the fuzzy-probability model developed for assessing the risks. Based on the research results, the authors developed a 3-D visualization for the surface of fuzzy-probability model for assessing the structural and functional risks of the elements and element-to-element links in a complex technical system. The results of research of the fuzzy-probability model developed for assessing the risks in complex technical systems made it possible to assess the effect of damage and failure probability of the elements and element-to-element links on a total risk level of a complex technical system. The research and development results obtained make it possible to improve the efficiency of operation of complex technical systems and to give a high-quality forecast of their operational reliability under various emergency scenarios.

**Keywords:** fuzzy modeling, complex technical systems, risk assessment, fuzzy logic, fuzzy-probability model.