

## ОЦЕНКА БЕЗОПАСНОСТИ ЭКСПЛУАТАЦИИ МАШИННЫХ АГРЕГАТОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ТЕОРИИ НЕЧЕТКИХ МНОЖЕСТВ

Юмагузин У.Ф.<sup>1</sup>, Баширов М.Г.<sup>1</sup>, Маликов С.В.<sup>2</sup>, Маликов А.В.<sup>2</sup>, Максютков И.Н.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Филиал ФГБОУ ВПО «Уфимский государственный нефтяной технический университет» в г. Салавате, Салават, Россия (453250, Республика Башкортостан, г. Салават, ул. Губкина, д. 22Б), e-mail: ural1503@gmail.com

<sup>2</sup>ООО «РемЭнергоМонтаж», Салават, Россия (453250, Республика Башкортостан, г. Салават, ул. Молодогвардейцев, д. 41), e-mail: eapp@yandex.ru

---

Разработан метод количественной оценки безопасности эксплуатации машинных агрегатов с применением теории нечетких множеств в условиях неопределенности и многофакторности развития аварийных ситуаций. При оценке безопасности эксплуатации машинных агрегатов с использованием теории нечетких множеств необходимо учитывать технический, технологический, человеческий факторы, а также вероятность взрыва и пожара. С использованием пакета Fuzzy Logic программного комплекса Matlab получены программные реализации системы нечеткого вывода для оценки безопасности эксплуатации машинных агрегатов. Приведены параметры функций принадлежности входных и выходных лингвистических переменных нечеткого вывода. Разработана автоматизированная система управления безопасной эксплуатацией машинных агрегатов, составной частью которой является устройство дистанционной диагностики, в основу которого положен метод оценки технического состояния на основе анализа гармонического состава токов и напряжений.

---

Ключевые слова: безопасность, машинные агрегаты, теория нечетких множеств, техническое состояние.

## ASSESSMENT OF SAFETY OF OPERATION OF MACHINE UNITS USING THE FUZZY SETS THEORY

Yumaguzin U.F.<sup>1</sup>, Bashirov M.G.<sup>1</sup>, Malikov S.V.<sup>2</sup>, Malikov A.V.<sup>2</sup>, Maksyutov I.N.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Ufa state petroleum technological university, Salavat, Russia (453250, Bashkortostan, street Gubkina, 22B), e-mail: ural1503@gmail.com

<sup>2</sup>ООО RemJenergoMontazh, Russia, Salavat, 453250, The Republic of Bashkortostan, Molodogvardeyev street, 41, e-mail: eapp@yandex.ru

---

The method for quantitative evaluation of safety of operation of machine units using fuzzy set theory in the face of uncertainty and comprehensiveness of emergencies. In assessing the safety of operation of machine units with the use of fuzzy sets theory must take into account technical, technological, human factors, and the risk of explosion and fire. Using Fuzzy Logic Toolbox for Matlab software implementations obtained fuzzy inference system to evaluate the safety of machine units. The parameters of the membership functions of input and output linguistic variables of fuzzy inference. The automated control system of safe machine operation units, part of which is a device for remote diagnostics of induction motors, based on the method of estimation of technical condition on the basis of the analysis of harmonic currents and voltages.

---

Key words: safety, machine tools, fuzzy sets theory, technical condition.

Ускорение темпов и расширение масштабов производственной деятельности в современных условиях неразрывно связано с возрастающим использованием энергонасыщенных технологий и опасных веществ. В результате возрастает потенциальная угроза для здоровья и жизни людей, окружающей среды, материальной базы производства. В первую очередь, это относится к объектам нефтегазовой отрасли, где наблюдаются постоянная интенсификация технологий, связанная с возрастанием температур и давлений, укрупнение единичных мощностей установок и аппаратов, наличие в них больших запасов взрыво-, пожаро- и токсикоопасных веществ [7]. Возникновение и развитие опасных

ситуаций при эксплуатации машинных агрегатов обусловлено влиянием технического состояния, пожаро- и взрывоопасностью оборудования, изменением параметров технологических процессов, а также человеческого фактора. В настоящее время существует большое количество алгоритмов и методов оценки данных факторов, но при этом методы оценки безопасности эксплуатации в условиях многофакторности и неопределенности остаются недостаточно проработанными. Объединение в одном методе различных по природе факторов с целью количественной оценки безопасности эксплуатации не может быть осуществлено при помощи традиционных математических методов, что обусловлено [4]:

- сложностью динамически развивающихся технических систем и алгоритмов функционирования;
- необходимостью выполнения многофакторного анализа;
- возникновением неопределённости, обусловленной наличием человеческого фактора, который создает условия, при которых теория вероятности не способна корректно описать и в полной мере количественно оценить исследуемый фактор;
- наличием слабоформализуемых процедур, необходимых для принятия решений, направленных на повышение безопасности эксплуатации.

Решение задачи оценки безопасности эксплуатации машинных агрегатов в условиях многофакторности и неопределенности возможно при использовании аппарата теории нечетких множеств [2, 3]. При оценке безопасности эксплуатации машинных агрегатов необходимо учитывать следующие факторы:

- человеческий фактор, учитывающий субъективное влияние личностных и профессиональных качеств обслуживающего персонала на безопасность эксплуатации;
- технологический, учитывающий нестационарность параметров технологических процессов;
- технический фактор, оценивающий нестационарность технического состояния оборудования;
- вероятность возникновения взрыва и/или пожара при эксплуатации машинных агрегатов.

Алгоритм оценки безопасности эксплуатации машинных агрегатов на основе теории нечетких множеств представлен на рисунке 1. С использованием пакета Fuzzy Logic Toolbox for Matlab получены программные реализации системы нечеткого вывода для оценки безопасности эксплуатации машинных агрегатов.

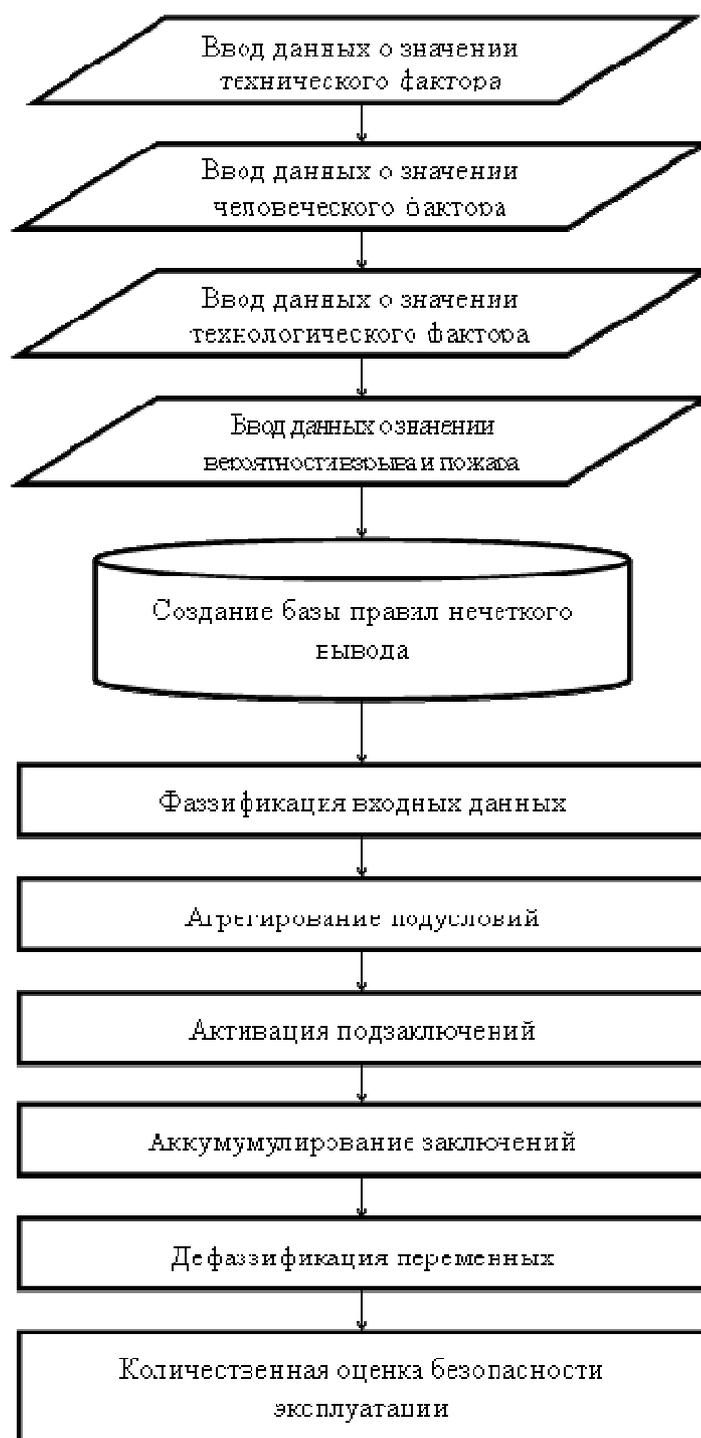


Рисунок 1. Алгоритм оценки безопасности эксплуатации машинных агрегатов с использованием теории нечетких множеств

При оценке технического фактора (таблица 1), рассчитываемого в режиме реального времени, используются следующие параметры:

- текущее техническое состояние;
- прогнозируемое техническое состояние;
- срок эксплуатации;
- критичность отказа оборудования.

В настоящее время наиболее распространенным методом оценки технического состояния машинных агрегатов является вибрационно-диагностический метод. Одним из наиболее перспективных методов является метод анализа гармонического состава токов и напряжений, генерируемых двигателем электропривода [1]. Наличие в спектре токов и напряжений гармонических составляющих определенных частот и определенной интенсивности свидетельствует о наличии повреждений электрической и/или механической части оборудования. Проведение мониторинга токов и напряжений электропривода может быть выполнено без какого-либо нарушения режима работы машинных агрегатов. В отличие от вибрационного метода, который нашел широкое применение для оценки технического состояния машинных агрегатов, метод, основанный на анализе гармонического состава токов и напряжений двигателя электропривода, позволяет выявлять одновременно механические и электрические повреждения, а также вести удаленный мониторинг технического состояния. Физический принцип, положенный в основу метода, заключается в том, что любые возмущения в работе электрической и механической частей насосного оборудования приводят к изменениям магнитного потока в зазоре электрической машины, и, следовательно, к модуляции тока, потребляемого электродвигателем. Таким образом, наличие в спектре тока двигателя характерных частотных составляющих свидетельствует о наличии повреждений электрической или механической части оборудования.

Авторегрессионные модели проинтегрированного скользящего среднего и нейросетевые модели являются наиболее распространенными моделями прогнозирования [8]. Анализ данных моделей с целью прогнозирования изменения временного ряда диагностического параметра, показал, что средняя абсолютная ошибка прогнозирования значений виброскорости машинного агрегата при кросс-проверке для модели авторегрессии и скользящего среднего составила 17,3%, для модели искусственных нейронных сетей многослойного перцептрона 12,9%, что свидетельствует о достаточной для практических целей точности прогноза исследуемых моделей.

По результатам экспериментальных исследований разработано программное обеспечение для оценки и прогнозирования технического состояния машинных агрегатов [6] на основе анализа гармонического состава токов и напряжений, генерируемых двигателями электропривода, температуры подшипников насосного агрегата и изоляции обмотки статора. Программа разработана с использованием языка программирования Borland Delphi с использованием библиотеки Neural Base от Base Group Labs, а также языка C++. Разработано устройство дистанционной оценки технического состояния машинных агрегатов [5].

Классификация оборудования по степени критичности отказа:

– 1-я категория – критической оборудование, внезапный отказ которого способен стать причиной аварии, вызвать серьезное снижение технико-экономических показателей производства, остановку технологического процесса;

– 2 категория – отказ данного оборудования способен привести к незначительному снижению технико-экономических показателей производства.

– 3-я категория – вспомогательное оборудование, выход из строя которого не оказывает существенного влияния на безопасность технологического процесса, а приводит к необоснованным затратам на реализацию операций по техническому обслуживанию и ремонту;

– 4-я категория – выход из строя данного оборудования не оказывает влияния на безопасности технологических процессов.

Таблица 1

Описание входных переменных для оценки технического фактора

Составляющие технического фактора	Терм-множества	Функция принадлежности*	Параметры функции принадлежности
Техническое состояние	Отлично	Z	[0;0,2]
	Хорошо	П	[0,1;4;0,2]
	Допустимо	П	[0,15;4;0,4]
	Требуется проведения мероприятий	П	[0,2;4;0,7]
	Недопустимо	S	[0,8;1]
Прогнозируемое техническое состояние	Отлично	Z	[0;0,2]
	Хорошо	П	[0,1;4;0,2]
	Допустимо	П	[0,15;4;0,4]
	Требуется проведения мероприятий	П	[0,2;4;0,7]
	Недопустимо	S	[0,8;1]
Срок эксплуатации	Малый	T	[0;0;3;7]
	Средний	T	[3;7;15;19]
	Большой	T	[15;19;40;40]
Критичность отказа оборудования	1-категория	Δ	[0,9;1;1,1]
	2-категория	Δ	[1,9;2;2,1]
	3-категория	Δ	[2,9;3;3,1]
	4-категория	Δ	[3,9;4;4,1]
* Z – z-подобная функция принадлежности; S – s-подобная функция принадлежности; П – обобщенная колоколообразная функция принадлежности; T – трапециевидная функция принадлежности; Δ – треугольная функция принадлежности;			

При оценке влияния человеческого фактора учитываются следующие параметры (таблица 2):

- профессионализм обслуживающего персонала;
- личностные качества;

- психофизиологические качества;
- контроль работы и знаний.

Алгоритм оценки вероятности взрыва или пожара при эксплуатации машинных агрегатов содержится в ГОСТ 12.1.004-91 «Пожарная безопасность». Для фаззификации входной переменной (таблица 3) «Вероятность взрыва и пожара» использовался РД 03-418-01 «Методические указания по проведению анализа риска опасных производственных объектов», который устанавливает методические принципы, термины и понятия анализа риска, общие требования к процедуре и оформлению результатов, а также представляет основные методы анализа опасностей и риска аварий на опасных производственных объектах.

Технологический фактор (таблица 3) учитывает изменение параметров технологических процессов (давление нагнетания, давление в полости статора, перепад давления, токовая защита, температура перекачиваемой среды). При количественной оценке фактора используются значения технологических параметров  $p_i$ , измеряемые в реальном времени, а также информация о допустимых пределах изменения. Так как параметры технологического процесса являются различными по своей природе и имеют различные пределы измерений, необходимо предварительно нормировать параметры согласно выражению:

$$q_{p_i} = \begin{cases} 1, \text{ при } p_i < p_i^{\text{н}} \\ \frac{p_i^{\text{л}} - p_i}{p_i^{\text{л}} - p_i^{\text{н}}}, \text{ при } p_i^{\text{н}} < p_i < p_i^{\text{л}} \\ 0, \text{ при } p_i^{\text{л}} < p_i < p_i^{\text{н}} \\ \frac{p_i - p_i^{\text{н}}}{p_i^{\text{н}} - p_i^{\text{л}}}, \text{ при } p_i^{\text{н}} < p_i < p_i^{\text{л}} \\ 1, \text{ при } p_i > p_i^{\text{н}} \end{cases} . \quad (1)$$

где  $p_i$  – текущее значение параметра;

$p_i^{\text{н}}$ ,  $p_i^{\text{л}}$  – предупредительные значения параметра;

$p_i^{\text{нн}}$ ,  $p_i^{\text{лл}}$  – предельно допустимые значения параметра.

В результате данной процедуры все параметры технологического процесса являются безразмерными и изменяются в диапазоне [0; 1].

Значение степени влияния технологического фактора равно

$$S = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - q_{p_i}) . \quad (2)$$

где  $q_p$  – значение  $i$ -го технологического параметра.

Описание входных переменных для оценки человеческого фактора

Составляющие человеческого фактора	Терм-множества	Функция принадлежности	Параметры функции принадлежности
Профессионализм обслуживающего персонала	Низкий	Z	[0;0,2]
	Средний	П	[0,1;4;0,2]
	Высокий	S	[0,15;4;0,4]
Личностные качества	Низкий	Z	[0,2;4;0,7]
	Средний	П	[0,8;1]
	Высокий	S	[0;0,2]
Психофизиологические качества	Низкие	Z	[0,1;4;0,2]
	Средние	П	[0,15;4;0,4]
	Высокие	S	[0,2;4;0,7]
Контроль работы и знаний	Низкий	Z	[0,8;1]
	Средний	П	[0;0;3;7]
	Высокий	S	[3;7;15;19]

Таблица 3

Описание параметров переменных «Вероятность взрыва и пожара», «Технологический фактор»

Наименование фактора	Терм-множества	Тип функции принадлежности	Значения параметров
Вероятность взрыва и пожара	Частая	S	[3,8;4,3]
	Вероятная	П	[0,5;7;3,5]
	Возможная	П	[0,5;7;2,5]
	Редкая	П	[0,5;7;1,5]
	Практически невероятная	Z	[0,7;1,2]
Технологический фактор	Допустимо	S	[0; 1]
	Недопустимо	Z	[0;1]

Анализ исследуемых факторов на основе теории нечетких множеств позволяет количественно оценить и качественно описать безопасность эксплуатации машинных агрегатов (таблица 4).

Таблица 4

Параметры переменной «Безопасность эксплуатации»

Нечеткое множество	Тип функции принадлежности	Значения параметров
Низкая	S	[0;4;0,2]
Средняя	П	[0,15;4;0,4]
Высокая	Z	[0,2;4;1]

Предложенный метод оценки безопасности эксплуатации позволит обоснованно принимать управленческие решения на основе ранжирования оборудования по степени опасности.

## Список литературы

- 1 Кузеев И.Р., Баширов М.Г., Прахов И.В., Баширова Э.М., Самородов А.В. Способ диагностики механизмов и систем с электрическим приводом // Патент России №2431152. 2011. Бюл. №28.
- 2 Немчинов Д.В. Управление рисками аварийных ситуаций на промышленных объектах : на примере установки хлорирования воды : Автореф. дис. канд. техн. наук. — Астрахань, 2009. — 24 с.
- 3 Оськин А.А. Разработка метода оценки индивидуального пожарного риска резервуарных парков с использованием теории нечетких множеств : Автореф. дис. канд. техн. наук. — М, 2011. — 32 с.
- 4 Переездчиков И.В. Разработка основ анализа опасностей промышленных систем «человек-машина-среда» на базе четких и нечетких множеств : Автореф. дис. доктора. техн. наук. — М, 2005. — 32 с.
- 5 Прахов И.В., Юмагузин У.Ф., Баширова Э.М., Миронова И.С. Устройство дистанционной диагностики асинхронных электродвигателей// Патент России №147268. 2014. Бюл. №30
- 6 Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2012615158. Оценка технического состояния электрооборудования на основе интегральных параметров / М. Г. Баширов, И. С. Миронова, У.Ф. Юмагузин, В. Г. Акчулпанов (Россия). №2012615158; Заявлено 10.04.2012, №2012612700. Опубл.08.06.2012.
- 7 Юмагузин, У.Ф. Повышение безопасности эксплуатации оборудования нефтегазовой отрасли / У.Ф. Юмагузин, М.Г. Баширов // Современные проблемы науки и образования: электронный научный журнал. – 2014. – № 1. – URL: <http://www.science-education.ru/> 115-11869 (дата обращения: 18.12.2014).
- 8 Юмагузин, У.Ф. Прогнозирование остаточного ресурса оборудования предприятий нефтегазовой отрасли / У.Ф. Юмагузин, М.Г. Баширов // Фундаментальные исследования. – 2014. – № 3. – С. 277 - 280.

### Рецензенты:

Вильданов Р.Г., д.т.н., профессор, филиал ФГБОУ ВПО УГНТУ в г. Салавате, г. Салават;  
Жирнов Б.С., д.т.н., профессор, филиал ФГБОУ ВПО УГНТУ в г. Салавате, г. Салават.