

О. В. Прокофьев, А. Е. Савочкин

## МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ ОБНАРУЖЕНИЯ ПРЕДАВАРИЙНОЙ СИТУАЦИИ НА ОСНОВЕ НЕЧЕТКОЙ КОГНИТИВНОЙ КАРТЫ

O. V. Prokof'ev, A. E. Savochkin

### MODELING OF THE DETECTION SYSTEM OF PRE-EMERGENCY SITUATION BASED ON THE FUZZY COGNITIVE MAP

**Аннотация.** Состояние технически сложного объекта (ТСО) в процессе работы определяется с помощью комплекса параметрических датчиков, позволяющего определять характеристики динамики как внешней среды эксплуатации, так и показателей функционирования самого объекта. Выходные сигналы датчиков могут отображать наличие кратковременных, ступенчатых и прочих нагрузок, изменений в структуре случайной составляющей сигнала, а также позволяют сделать прогноз о приближении режима работы к предаварийной ситуации. Построение системы мониторинга возможно на концептуальной основе нечетких когнитивных карт. Данный подход позволяет не прибегать к усложнению применяемого математического аппарата и проводить имитационное моделирование процесса управления ТСО. Форма реализации системного подхода к проектированию в терминах нечетких когнитивных карт позволяет составить сценарии поведения системы мониторинга и управления, провести оценку информационной ценности выводов по результатам обработки сигналов отдельных датчиков.

**Ключевые слова:** технически сложный объект, система обнаружения предаварийной ситуации, нечеткая когнитивная карта.

**Abstract.** The state of a technically complex object (TCO) in the process of operation is determined with the help of a complex of parametric sensors, which makes it possible to determine the characteristics of the dynamics of both the external environment of operation and the performance of the object itself. Output signals of the sensors can show the presence of short-term, step-by-step and other loads, changes in the structure of the random component of the signal, and also make it possible to predict the approach of the operating mode to the pre-emergency situation. The construction of a monitoring system is possible on a conceptual basis of fuzzy cognitive maps. This approach makes it possible not to resort to complicating the applied mathematical apparatus and to carry out simulation simulation of the TCO control process. The form of realization of the system approach to designing in terms of fuzzy cognitive maps allows to make scenarios of the behavior of the monitoring and control system, to evaluate the information value of the conclusions based on the results of processing the signals of individual sensors.

**Key words:** technically complex object, detection system of pre-emergency situation, fuzzy cognitive map.

### Введение

Подготовка к работе ТСО связана с анализом показаний множества параметрических датчиков, выполняющих измерительное преобразование физических величин различной природы. Во время подготовки к режиму работы и в процессе движения объекта проявляется действие объективных условий работы, внешней среды, корректировки задания, которые могут привести к появлению предаварийной ситуации. В выходных сигналах датчиков могут проявляться последствия температурного и временного дрейфа их характеристик, износа аппаратуры, влияния электромагнитных шумов, вибраций, изменения внешней физической среды, оперативной корректировки, пересмотра цели управления ТСО в процессе работы [1, 2]. Привести поступающие потоки информации в единую систему, задать приоритеты или степени значимости того или иного показателя, определить причинно-следственные связи и сделать конечные выводы для управления объектом возможно на основе системного подхода к проектированию. Элементами системы здесь являются не только физические существующие выходные сигналы датчиков, прошедшие аналого-цифровое преобразование, но и виртуальные составляющие: результаты проверки свойств сигналов в программных модулях, результаты выполнения логических правил. Несмотря на виртуальный характер ряда элементов, системный

подход может быть полноценно реализован в модели системы контроля ТСО, так как речь идет об устойчивой структуре с конкретными связями между элементами и возможной оценкой состояния системы. Концепция построения системы контроля служит для обеспечения возможности управления объектом как в режиме поддержки принятия решений, так и в автоматическом режиме.

### Постановка задачи и ее практическая значимость

В данной работе была поставлена цель построения модели, отражающей процесс контроля работы ТСО с возможностью предсказывать переход в предаварийное состояние по ряду причин или по комбинации причин. Для достижения цели предложен вариант модели системы контроля за состоянием ТСО, функционирующий на коротких отрезках временного ряда при управлении процессом движения и на подготовительной стадии. Например, в задачах по разработке интегральной модульной авионики для того, чтобы реагировать на отказ, который может иметь катастрофические последствия, интервал обработки данных не должен превышать одной секунды (катастрофическая ситуация развивается как минимум в течение одной секунды [3]).

Инструментом реализации модели стала нечеткая когнитивная карта [4] (Fuzzy Cognitive Map, FCM), отвечающая цели исследования и системному подходу к решению задач. Элементы системы контроля представляют собой концепты (факторы) FCM, изображаемые как вершины ориентированного графа. Факторы характеризуются числовым уровнем и связаны между собой дугами ориентированного графа, веса которых отражают интенсивность причинной связи. Факторы, не зависящие от других (в рамках рассматриваемой системы контроля), относятся к состоянию внешней среды и прочим обстоятельствам, повлиять на которые в процессе работы ТСО невозможно.

Представляет интерес исследование функциональной устойчивости и работоспособности системы контроля, использующей математический аппарат FCM.

### Базовая методология

Одним из подходов к построению модели сценариев развития отношений является построение нечеткой когнитивной карты [4], вариант которой представлен на рис. 1.

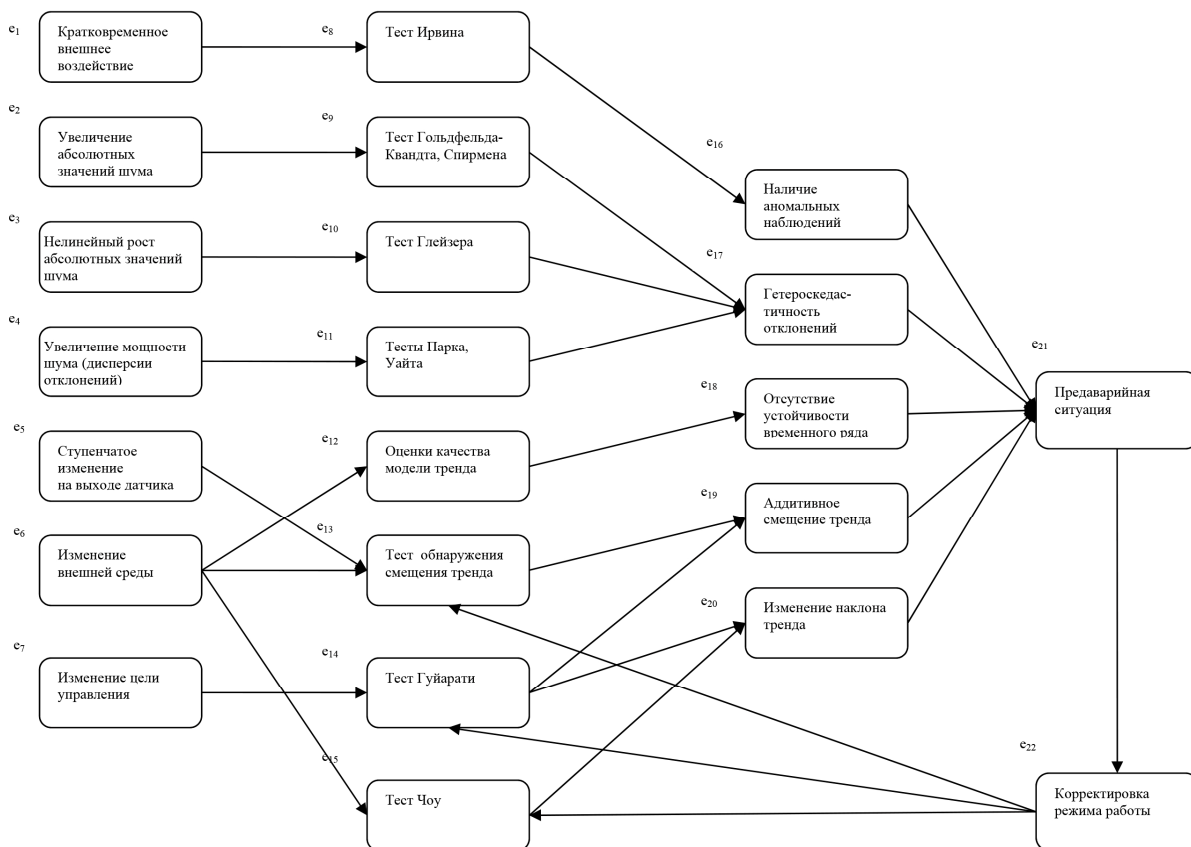


Рис. 1. Нечеткая когнитивная карта

Причинно-следственные связи в виде дуг ориентированного графа слева направо отражают логические цепочки: «изменение структуры выходного сигнала датчика» – «результат теста» – «вывод». Дуги графа, направленные справа налево, соответствуют «субъективной» части причинно-следственных связей, которые зависят от корректировки режима работы ТСО, т.е. когда влияние соответствующих факторов-причин может быть существенно уменьшено.

Включенные в модель факторы (концепты) характеризуются начальным уровнем, изменение которого возможно в процессе функционирования системы, а также отношениями с другими факторами с различной теснотой связи (интенсивностью). Кроме того, в модели присутствуют концепты экзогенного типа, не имеющие причин изменения в рамках моделируемой системы, но имеющие причины во внешней среде эксплуатации СТО. В изображенной схеме принято, что концепты  $e_1 - e_4$  относятся, преимущественно, к объективно существующим внешним причинам, а  $e_5 - e_7$  относятся к «субъективным» причинам, доступным для корректировки путем изменения режима работы СТО. Обратная связь в системе, изображенная между  $e_{22}$  и  $e_{13}, e_{14}, e_{15}$ , отображает возможность этой корректировки.

Моделирование произведено с помощью метода, реализованного Guillermo Ochoa de Aspuru в разработанном им Java-приложении [5]:

$$L_i^{(k)} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n L_{ij}^{(k-1)},$$

$$L_{ij}^{(k-1)} = E_{ij} (L_j^{(k-1)} - L_i^{(k-1)}) I_{ij} / 100,$$

$$i = \overline{1, n} \quad j = \overline{1, n},$$

где  $k$  – номер итерации;  $L_i^{(k)}$  – уровень фактора  $i$  в диапазоне от 0 до 100;  $L_{ij}^{(k-1)}$  – результат воздействия фактора  $j$  на фактор  $i$ ;  $E_{ij}$  – направление влияния, принимает значение  $-1$  или  $1$ ;  $I_{ij}$  – интенсивность причинной связи, принимает значение в диапазоне от 0 до 100.

### Технология проведения эксперимента и полученные результаты

Уровни факторов и интенсивности связей оцениваются в условных единицах от 0 до 100 и в ряде случаев выявляются в результате обработки мнений экспертов [6]. Значения интенсивности связей представлены в табл. 1.

Таблица 1

Интенсивность связей

Концепт – следствие	Концепт – причина	Интенсивность связи	Концепт – следствие	Концепт – причина	Интенсивность связи
1	2	3	4	5	6
$e_1$			$e_{12}$	$e_6$	50
$e_2$			$e_{13}$	$e_5$	50
				$e_6$	50
				$e_{22}$	50
$e_3$			$e_{14}$	$e_7$	50
				$e_{22}$	50
$e_4$			$e_{15}$	$e_6$	50
				$e_{22}$	50
$e_5$			$e_{16}$	$e_8$	50
$e_6$			$e_{17}$	$e_9$	50
				$e_{10}$	50
				$e_{11}$	50
$e_7$			$e_{18}$	$e_{12}$	50
$e_8$	$e_1$	50	$e_{19}$	$e_{13}$	50
				$e_{14}$	50
$e_9$	$e_2$	50	$e_{20}$	$e_{14}$	50
				$e_{15}$	50

Окончание табл. 1

1	2	3	4	5	6
$e_{10}$	$e_3$	50	$e_{21}$	$e_{16}$	75 100
				$e_{17}$	75 100
				$e_{18}$	75 100
				$e_{19}$	75 100
				$e_{20}$	75 100
$e_{11}$	$e_4$	50	$e_{22}$	$e_{21}$	75 100

Как следует из табл. 1, для концептов  $e_{21}$  и  $e_{22}$  в эксперименте рассматривалось несколько вариантов интенсивностей связей с концептами-причинами. Перечень факторов создан в основном диалоговом окне программы (рис. 2), а значения интенсивностей связей (эффектов) и начальные значения уровней факторов введены в окне редактора (рис. 3). Там изображен пример ввода положительной связи интенсивностью 50 между концептом-следствием  $e_{11}$  и концептом-причиной  $e_4$ .

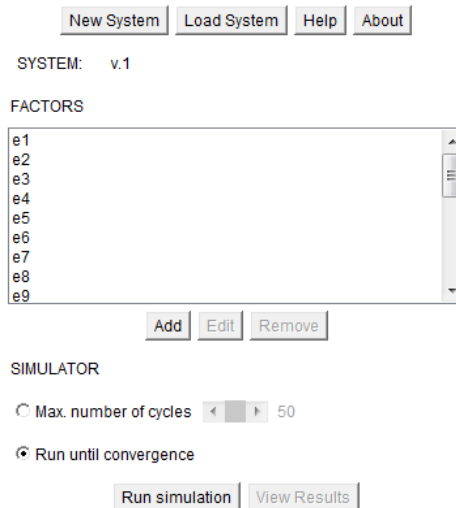


Рис. 2. Главное диалоговое окно

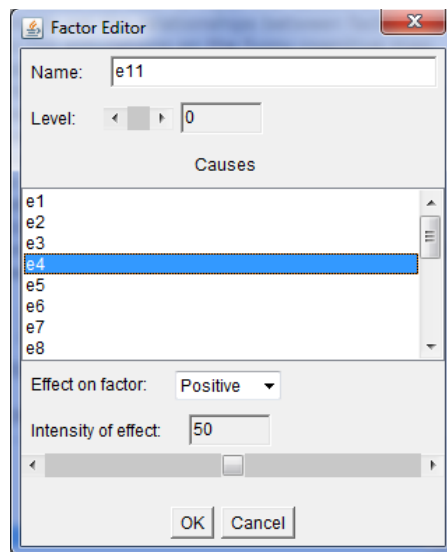


Рис. 3. Редактор свойств фактора

Скриншот окна вывода результатов испытаний представлен на рис. 4.

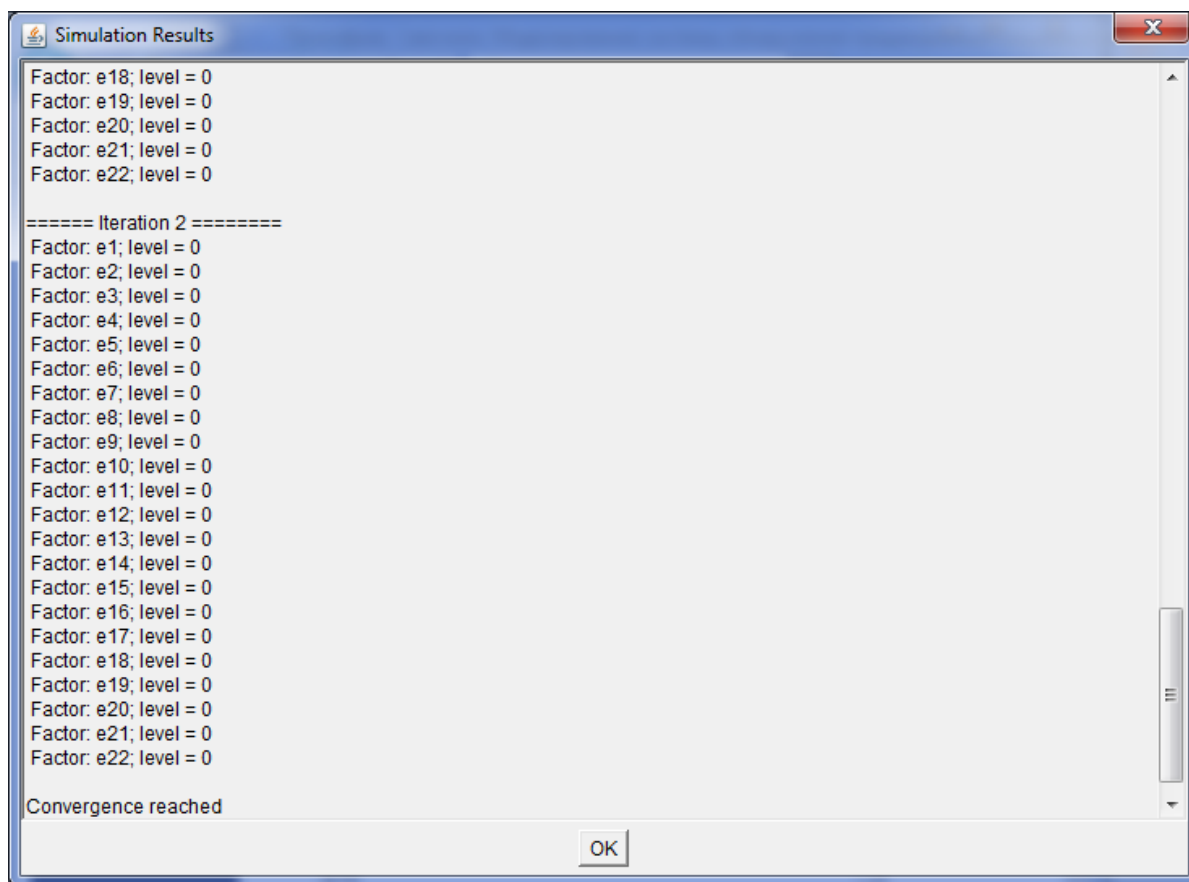


Рис. 4. Окно вывода результатов испытаний (симуляции)

Итерационный процесс, запускаемый для перехода карты в новое установившееся состояние, останавливался по признаку нулевой нормы поправки между векторами состояния факторов на соседних итерациях (Run until convergence).

Результаты исследований с помощью когнитивной карты получены в итоге итерационных процессов (Convergence reached), сходимость которых была достигнута во всех случаях.

### Анализ результатов экспериментов

Итоговые состояния концептов представлены в табл. 2. Строки соответствуют номерам экспериментов, количество итераций обозначено как К.

Таблица 2

Примеры результирующих состояний концептов

Концепт	1	2	3	4	5	6	7
1	2	3	4	5	6	7	8
e <sub>1</sub>	0	0	0	0	100	0	100
e <sub>2</sub>	0	0	0	0	100	0	100
e <sub>3</sub>	0	0	0	0	100	0	100
e <sub>4</sub>	0	50	50	100	100	0	100
e <sub>5</sub>	0	0	0	0	100	100	0
e <sub>6</sub>	0	0	0	0	100	100	0
e <sub>7</sub>	0	0	0	0	100	100	0
e <sub>8</sub>	0	0	0	0	100	0	100
e <sub>9</sub>	0	0	0	0	100	0	100
e <sub>10</sub>	0	0	0	0	100	0	100

Окончание табл. 1

1	2	3	4	5	6	7	8
$e_{11}$	0	50	50	100	100	0	100
$e_{12}$	0	0	0	0	100	100	0
$e_{13}$	0	0	0	0	100	100	0
$e_{14}$	0	0	0	0	100	100	0
$e_{15}$	0	0	0	0	100	100	0
$e_{16}$	0	0	0	0	100	0	100
$e_{17}$	0	16	16	33	100	0	100
$e_{18}$	0	0	0	0	100	100	0
$e_{19}$	0	0	0	0	100	100	0
$e_{20}$	0	0	0	0	100	100	0
$e_{21}$	0	3	3	6	100	60	40
$e_{22}$	0	3	3	6	100	60	40
<b>К</b>	2	8	8	8	12	12	11

Номера столбцов соответствуют номерам экспериментов, перечисленных ниже.

1. Нулевые состояния концептов означают работу элементов системы в нормативном состоянии и отсутствие вывода о предаварийной ситуации.

2. Увеличение мощности шума (дисперсии отклонений) представлено  $e_4$  равным 50, и это выявлено с помощью тестов Парка и Уайта ( $e_{11}$ ). Концепт предаварийной ситуации имеет состояние 3. Рекомендуется увеличение интенсивности причинно-следственных связей.

3. Интенсивность связи между  $e_{21}$  и концептами-причинами равна 75, между  $e_{22}$  и  $e_{21}$  равна 75 при прочих неизменных условиях. Состояние концепта предаварийной ситуации  $e_{21}$  не изменилось.

4. Увеличение мощности шума (дисперсии отклонений) представлено концептом  $e_4$ , состояние его оценено как 100. Состояние концепта предаварийной ситуации  $e_{21}$  увеличилось до 6.

5. Все концепты-причины от  $e_1$  до  $e_7$  активны и имеют значение 100. Интенсивность связи между  $e_{21}$  и концептами-причинами равна 100, между  $e_{22}$  и  $e_{21}$  равна 100 при прочих неизменных условиях. Все остальные концепты достигают уровня 100.

6. Активны концепты-причины только от  $e_5$  до  $e_7$  и имеют значение 100. Причины предаварийной ситуации связаны с заданием на движение ТСО, доступны корректировке. Концепты-причины от  $e_1$  до  $e_4$  имеют значение 0. Состояние концепта предаварийной ситуации  $e_{21}$  увеличилось до 60.

7. Ситуация, обратная предыдущей. Активны концепты-причины только от  $e_1$  до  $e_4$  и имеют значение 100. Концепты-причины от  $e_5$  до  $e_7$  имеют значение 0. Состояние концепта предаварийной ситуации  $e_{21}$  изменилось и стало равным 40.

### Заключение

Эксперименты 2–4 показывают важность настройки чувствительности системы контроля как с помощью уровней состояния концептов, так и с помощью интенсивностей причинно-следственных связей. Не является бесспорным и соотношение между уровнями концепта предаварийной ситуации  $e_{21}$  60 и 40, соответствующими экспериментам 6 и 7. Несмотря на это, тестирование модели показывает ее адекватность в широком смысле, так как не обнаруживается противоречий между конечными установившимися состояниями системы и фундаментальными представлениями в предметной области. Достижение функциональной устойчивости и работоспособности системы контроля достигается только при комплексном подходе к оценке угрозы приближения к предаварийной ситуации. Используемый здесь инструментарий нечетких когнитивных карт достаточно плодотворен в отношении охвата смежных предметных областей [6, 7] и не связан с существенным ростом сложности алгоритма при усложнении параметрической датчиковой аппаратуры.

### Библиографический список

1. Михеев, М. Ю. Математическое обеспечение автоматизированной информационной подсистемы проверки стабильности структуры временного ряда / М. Ю. Михеев, О. В. Прокофьев, И. Ю. Семочкина, А. Е. Савочкин // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. Сер.: Технические науки. Информационная технология. – 2014. – № 1 (3). – С. 193–203.

2. *Михеев, М. Ю.* Математические и информационно-структурные модели прогнозирования состояния технически сложных объектов / М. Ю. Михеев, О. В. Прокофьев, А. Е. Савочкин, М. А. Линкова // Прикаспийский журнал: управление и высокие технологии. – 2015. – № 4 (32). – С. 232–249.
3. *Авакян, А. А.* Мониторинг рабочего состояния отказоустойчивой платформы / А. А. Авакян, М. В. Копненко, А. К. Максимов // Надежность и качество сложных систем. – 2016. – № 3 (15). – С. 67–79.
4. *Bart Kosko.* Fuzzy Thinking: The New Science of Fuzzy Logic / Bart Kosko. – New York : Hyperion, 1993. – 320 p.
5. Guillermo Ochoa de Aspuru. Fuzzy Cognitive Maps. – URL: <http://www.ochoadeaspuru.com/fuzcogmap/index.php>
6. *Михеев, М. Ю.* Методы анализа данных и их реализация в системах поддержки принятия решений : учеб. пособие / М. Ю. Михеев, О. В. Прокофьев, И. Ю. Семочкина. – Пенза : Изд-во ПГУ, 2014. – 118 с.
7. *Vasantha Kandasamy, W. B.* Fuzzy Cognitive Maps and Neutrosophic Cognitive Maps / W. B. Vasantha Kandasamy, Florentin Smarandache. – Xiquan, Phoenix, 2003. – 212 p.

---

**Прокофьев Олег Владимирович**

кандидат технических наук, доцент,  
кафедра информационных технологий и систем,  
Пензенский государственный  
технологический университет  
(440039, Россия, г. Пенза,  
пр. Байдукова / ул. Гагарина, 1а/11)  
E-mail: [prokof\\_ow@mail.ru](mailto:prokof_ow@mail.ru).

**Савочкин Александр Евгеньевич**

аспирант,  
Пензенский государственный  
технологический университет  
(440039, Россия, г. Пенза,  
пр. Байдукова/ул. Гагарина, 1а/11)  
E-mail: [aebrat@mail.ru](mailto:aebrat@mail.ru)

**Prokof'ev Oleg Vladimirovich**

candidate of technical sciences, associate professor,  
sub-department of information technologies  
and systems,  
Penza State Technological University  
(440039, la/11 Baydukov direction / Gagarin street,  
Penza, Russia)

**Savochkin Aleksandr Evgen'evich**

postgraduate student,  
Penza State Technological University  
(440039, la/11 Baydukov direction / Gagarin street,  
Penza, Russia)

---

УДК 519.876.5

**Прокофьев, О. В.**

Моделирование системы обнаружения предаварийной ситуации на основе нечеткой когнитивной карты / О. В. Прокофьев, А. Е. Савочкин // Надежность и качество сложных систем. – 2018. – № 2 (22). – С. 73–79. – DOI 10.21685/2307-4205-2018-2-10.