

УДК 519.816

## ОСОБЕННОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ МОДЕЛЕЙ НА ОСНОВЕ ТЕОРИИ НЕЧЕТКИХ МНОЖЕСТВ ПРИ ИССЛЕДОВАНИИ СЛОЖНЫХ ЭРГАТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

<sup>1</sup>Железнов Э.Г., <sup>2</sup>Ефименко С.В., <sup>3</sup>Соклакова С.Ю.

<sup>1</sup>ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С.О. Макарова», Санкт-Петербург, e-mail: eduardz76@mail.ru;

<sup>2</sup>Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, e-mail: falcon.sergey@yandex.ru;

<sup>3</sup>ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С.О. Макарова», Санкт-Петербург,  
e-mail: sunshine\_93@mail.ru

Проблема исследования состояния и поведения сложных систем управления является ключевой для принятия эффективных решений. Для решения этой проблемы используются как классические методы формализованного представления систем (аналитические, статистические, теоретико-множественные и т.д.), так и методы, направленные на активизацию интуиции специалистов (методы организации сложных экспертиз, экспертные оценки, методы структуризации и т.д.). Однако динамика изменений факторов, влияющих на эффективность функционирования системы, требует разработки и применения специальных методов формализации и решения задач. К таким методам можно отнести имитационное и ситуационное моделирование, экспертные системы с использованием искусственного интеллекта и т.д. Эти инструменты позволяют учитывать высокую степень изменчивости целевых установок, условий функционирования и различных ограничений. В статье исследуется задача идентификации автоматизированных систем управления в условиях влияния факторов различной степени неопределенности. Проводится обобщенный анализ положительных и отрицательных свойств систем управления, где в качестве активного элемента выступает человек. В качестве возможных способов решения поставленной задачи рассматриваются методы теории нечетких множеств. Предложен алгоритм анализа эффективности автоматизированной системы управления. Приведен пример реализации алгоритма.

**Ключевые слова:** сложная система, эргатическая система, алгоритм, модель, нечеткие множества, эффективность

## FEATURES OF APPLICATION OF MODELS BASED ON THE THEORY OF FUZZY SETS IN THE STUDY OF COMPLEX ERGATIC SYSTEMS

<sup>1</sup>Zheleznov E.G., <sup>2</sup>Efimenko S.V., <sup>3</sup>Soklakov S.Yu.

<sup>1</sup>Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping,  
St. Petersburg, e-mail: eduardz76@mail.ru;

<sup>2</sup>Saint-Petersburg Mining University, St. Petersburg, e-mail: falcon.sergey@yandex.ru;

<sup>3</sup>Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping, St. Petersburg,  
e-mail sunshine\_93@mail.ru

The Problem of studying the state and behavior of complex control systems is a key one for making effective decisions. To solve this problem, we use both classical methods of formalized representation of systems (analytical, statistical, set-theoretic, etc.) and methods aimed at activating the intuition of specialists ( methods of organizing complex examinations, expert evaluations, structuring methods, etc.). However, the dynamics of changes in factors that affect the effectiveness of the system requires the development and application of special methods of formalization and problem solving. Such methods include simulation and situational modeling, expert systems using artificial intelligence, etc. These tools allow for a high degree of variability in target settings, operating conditions, and various constraints. The article examines the problem of identification of automated control systems under the influence of factors of various degrees of uncertainty. A generalized analysis of the positive and negative properties of control systems, where the active element is a person, is carried out. Methods of fuzzy set theory are considered as possible ways to solve this problem. An algorithm for analyzing the effectiveness of an automated control system is proposed. An example of the algorithm implementation is given.

**Keywords:** Complex system, ergatic system, algorithm, model, fuzzy sets, efficiency

Управление сложными системами требует от управляющей подсистемы сочетания противоположных по определению свойств, например устойчивости и гибкости (адаптивности). Классическим решением этого вопроса является сочетание технических средств управления с человеком. Участие человека-оператора в автоматизированной системе управления привносит в процесс управления как положительные, так и отрицательные факторы (риски) [1; 2]. К положительным факторам можно отнести высокую адаптивную способность человека к изменяющимся условиям, системное

мышление, высокий уровень абстрактного и интуитивного мышления, позволяющие быстро решать сложные задачи целеполагания. Все это способствует возникновению уникальных эмерджентных свойств в системе «человек – среда – машина» (СЧСМ). К отрицательным факторам относят высокую степень влияния на эффективность принимаемых решений психологического и физиологического состояния человека, ограниченные возможности переработки больших объемов информации, сложность оценки надежности звена «человек – оператор». Одновременно возрастает сложность

описания и оценки процессов управления в СЧСМ. Основные инструменты, используемые для анализа и прогнозирования поведения сложной системы, описанные в [3], требуют от исследователя анализа большого числа данных и навыков использования специализированных программных продуктов, что, в свою очередь, предполагает наличие солидных материальных и временных ресурсов. Использование методов «мягких вычислений» (нечеткие множества, нейронные сети, генетические алгоритмы) позволяет снизить размерность задач без потери качества и эффективности исследования [4]. В данной работе предложен вариант алгоритма исследования состояния эргатической автоматизированной системы управления предприятием на основе теории нечетких множеств [5].

Цель исследования: разработка возможных способов идентификации автоматизированных систем управления с помощью инструментов нечеткой логики.

#### Материалы и методы исследования

Необходимость поддерживать высокий уровень эффективности принимаемых решений в эргатических системах управления может быть реализована за счет применения концепции адаптивизации, выражающейся в использовании априорной, текущей и прогнозной информации о состоянии и поведении управляемой системы [6; 7] (рис. 1).

Основной методологией получения наиболее полной информации является системный подход, в рамках которого используются три основных метода: системный анализ, системное моделирование и синтез систем [8]. Для описания неопределенных показателей случайного происхождения разработаны мощные инструменты теории вероятности и математической статистики. Моделирование систем с использованием этих методов возможно при наличии достаточного объема статистических (т.е. количественных) данных, которые далеко не всегда можно получить. Вторым сложным моментом является ретроспективность обрабатываемых данных, т.е. не учитываются текущие показатели состояния управляемой системы. С увеличением сложности системы увеличивается влияние неопределенностей как случайного, так и нестохастического характера [9]. В отношении систем с активным элементом – человеком, количественная оценка ведет к построению неадекватной модели и, соответственно, к принятию неэффективных решений. Автоматизированные системы управления предприятия (АСУП) призваны принимать решения в постоянно

меняющихся условиях внешней и внутренней среды, на которые влияют факторы, не поддающиеся строгой количественной оценке. Природа факторов, влияющих на эффективность систем, подробно рассмотрена в [4]. Применение аппарата нечетких систем (множеств) может увеличить эффективность методики системного анализа адаптивных (гибких) систем различного назначения.

В качестве варианта реализации такого подхода предлагается следующий алгоритм.

1. Определить критерий (критерии) эффективности работы эргатической автоматизированной системы управления предприятием (АСУП). Выбор критерия зависит от целей проведения исследования.

2. Определить показатели (группы показателей), выражающие критерий (критерии) эффективности работы АСУП. Если критерий эффективности является комплексным, необходимо разбить его на ряд составляющих, наиболее информативных с точки зрения исследования.

3. Определить факторы (группы факторов), влияющие на показатели эффективности работы АСУП. Один из самых сложных этапов исследования, поскольку адекватность и достаточность факторов влияет на эффективность всего исследования.

4. Провести фазификацию (задать функцию принадлежности) факторов, влияющих на эффективность. Основные методы определения функции принадлежности отражены в [10]. В условиях полного отсутствия информации целесообразно использовать метод экспертных оценок или формулу Фишберна.

5. Построить нечеткую модель оценки влияния различных факторов (группы факторов) на эффективность работы АСУП.

6. Построить нечеткое отношение идентификации снижения устойчивости АСУП. Нечеткие отношения задаются в виде списка с перечислением всех кортежей, аналитически, графически, в форме матрицы, нечеткого графа (рис. 2).

#### Результаты исследования и их обсуждение

1. В качестве критерия эффективности работы эргатической АСУП предлагается выбрать – устойчивость системы [3] ( $Y$  – универсум устойчивости).

2. В качестве показателей устойчивости:  
 $y_1$  – надежность подсистемы «человек – оператор»

$y_2$  – надежность технической подсистемы

$y_3$  – надежность подсистемы «искусственный интеллект»

$$Y = \{y_1, y_2, y_3\}.$$

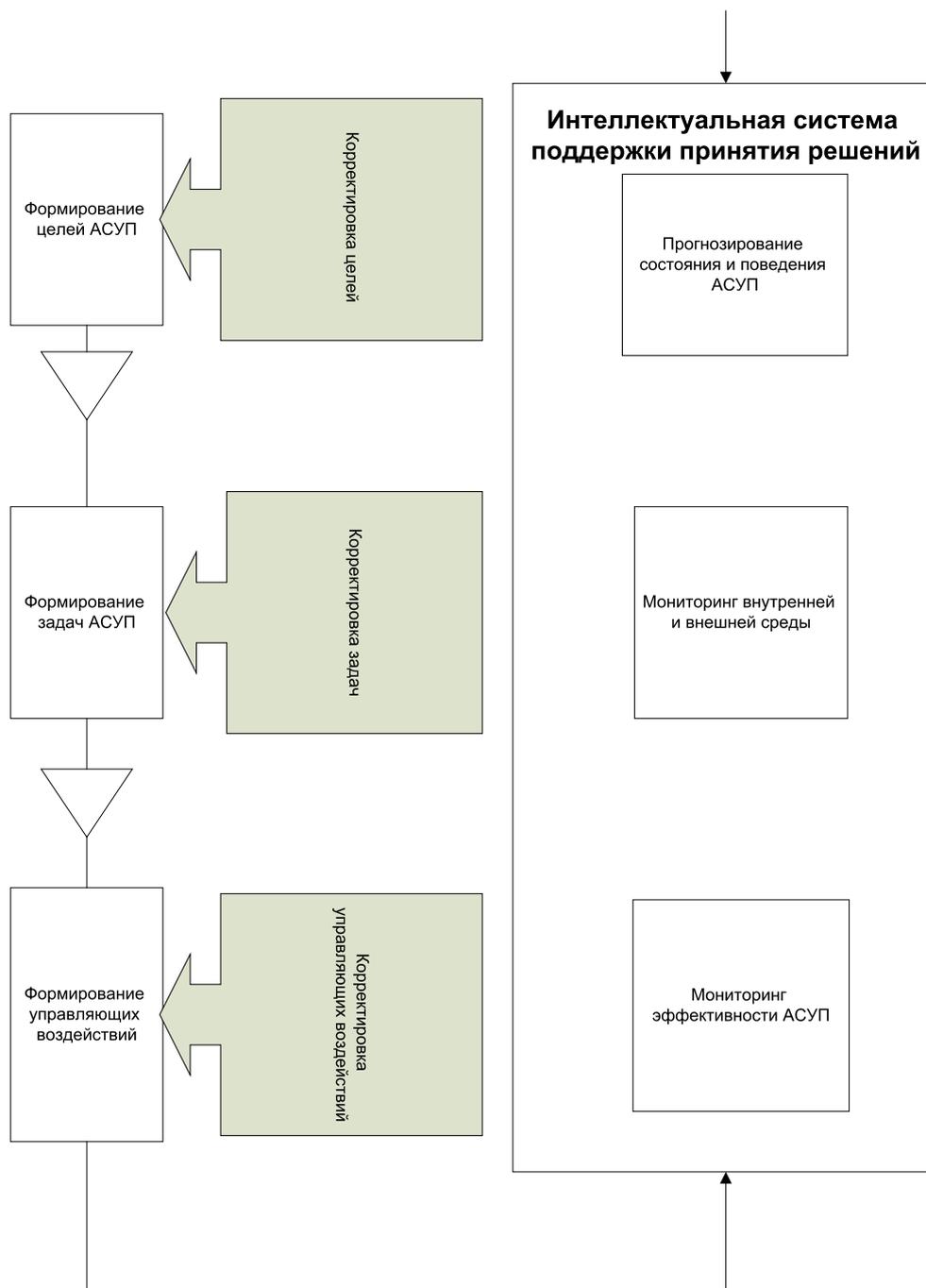


Рис. 1. Возможный вариант реализации концепции адаптивизации

3. В качестве факторов, влияющих на показатели эффективности, выделим четыре группы факторов ( $X$  – универсум факторов влияния):

- $x_1$  – человеческий фактор
- $x_2$  – качество технической подсистемы
- $x_3$  – мощность нейросистемы
- $x_4$  – факторы внешней среды

$$X = \{x_1, x_2, x_3, x_4\}.$$

4. Сформируем нечеткое множество  $X$  (функции принадлежности определяются прямым методом, например экспертным):

$$X = \langle x_1, \mu_x(0,6) \rangle, \langle x_2, \mu_x(0,9) \rangle, \\ \langle x_3, \mu_x(0,8) \rangle, \langle x_4, \mu_x(0,5) \rangle.$$

В условиях отсутствия возможности экспертной оценки можно использо-

вать косвенные методы, например формулу Фишберна:

$$\mu_x(x_i) = \frac{2(n-i+1)}{n(n+1)} (i = n, n-1),$$

где  $n$  – число элементов,  $i$  – ранг элемента (факторы необходимо предварительно ранжировать). Расчет начинается с элемента, имеющего наибольший ранг.

5. Определим среднее значение всех функций принадлежности в нечетком множестве  $X$ :

$$\mu_{cp} = \frac{\sum x}{n},$$

$$\mu_{cp} = 0,7.$$

6. Формализуем значение функций принадлежности для различных уровней устойчивости АСУП:

$$\text{Низкий } \mu_{yn} = 0,5;$$

$$\text{Средний } \mu_{yc} = 0,7;$$

$$\text{Высокий } \mu_{yb} = 0,9.$$

7. Сравниваем среднее значение функции принадлежности для факторов, влияющих на устойчивость АСУП, со значениями функций принадлежности для устойчивости АСУП. В данном примере она соответствует среднему уровню устойчивости АСУП.

8. Зададим нечеткое отношение идентификации снижения устойчивости АСУП.

9. Исходные данные:

Причины снижения устойчивости АСУП:

$x_1$  – человеческий фактор;

$x_2$  – неисправность технической подсистемы;

$x_3$  – неадекватность системы искусственного интеллекта;

$x_4$  – факторы внешней среды.

Последствия снижения устойчивости АСУП:

$y_1$  – увеличение времени принятия решений;

$y_2$  – принятие ошибочного решения;

$y_3$  – потеря управляемости;

$y_4$  – отказ системы.

Данные формализации нечетких отношений системы

	$y_1$	$y_2$	$y_3$	$y_4$
$x_1$	0,8	0,9	0,6	0,5
$x_2$	1	0,6	1	1
$x_3$	0,5	0,9	0,5	0
$x_4$	0,6	0,5	0,8	0,9

Запишем кортеж нечетких бинарных отношений:  $F = \{(\langle x_1, y_1 \rangle, 0,8), (\langle x_1, y_2 \rangle, 0,9), (\langle x_1, y_3 \rangle, 0,6), (\langle x_1, y_4 \rangle, 0,5), (\langle x_2, y_1 \rangle, 1,0), (\langle x_2, y_2 \rangle, 0,6), (\langle x_2, y_3 \rangle, 1,0), (\langle x_2, y_4 \rangle, 1,0), (\langle x_3, y_1 \rangle, 0,5), (\langle x_3, y_2 \rangle, 0,9), (\langle x_3, y_3 \rangle, 0,5), (\langle x_3, y_4 \rangle, 0), (\langle x_4, y_1 \rangle, 0,6), (\langle x_4, y_2 \rangle, 0,5), (\langle x_4, y_3 \rangle, 0,8), (\langle x_4, y_4 \rangle, 0,9)\}$  (таблица).

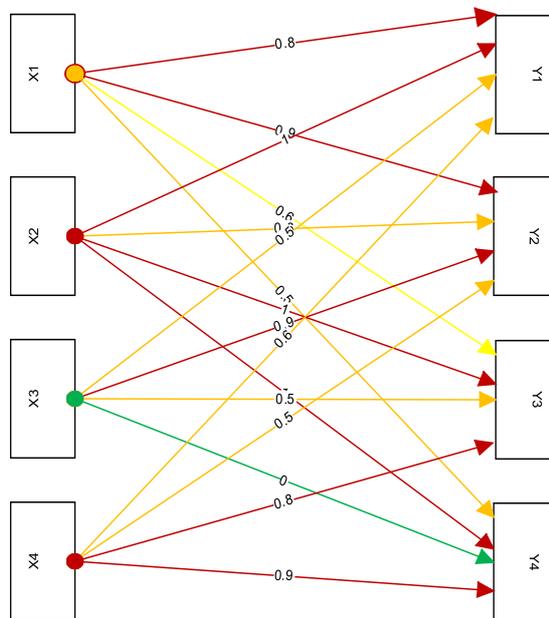


Рис. 2. Граф нечетких бинарных отношений системы

Вывод: снижение устойчивости АСУП происходит, в большей степени, под влиянием  $x_2$  фактора.

Реализация алгоритма позволяет решать широкий круг задач (в том числе многокритериальных): от выбора оптимальной системы управления до мониторинга состояния её основных показателей. В системе «человек – машина» возможно использование нечетких моделей для оценки эргономических свойств с применением лингвистических переменных. Следует также отметить высокую степень адаптивности методики в условиях дефицита временных и вычислительных ресурсов. Использование максимально понятного «интерфейса» упрощает восприятие лицом, принимающим решения (ЛПР), аналитической информации. Инструментальной базой алгоритма могут быть как имитационное, так и нейросетевое моделирование.

### Заключение

Применение инструментария нечетких множеств в задачах оценки эффективности функционирования эргатических АСУП позволяет давать предварительные оценки по-

казателей (состояний) функционирования систем в условиях отсутствия достаточной статистической информации о начальных состояниях и переходных процессах функционирования системы.

Предложенный алгоритм исследования эффективности эргатических АСУП может быть положен в основу создания экспертной системы с использованием элементов искусственного интеллекта [11].

#### Список литературы

1. Бодров В.А., Орлов В.Я. Психология и надежность: человек в системах управления техникой. М.: Изд-во «Институт психологии РАН», 1998. 288 с.
2. Ермолаева Марина Валерьевна эргономические исследования человеческого фактора в современных технических системах // Гуманитарный вестник. 2018. № 9 (71). DOI: 10.18698/2306-8477-2018-9-552.
3. Колесниченко С.В. Математическое моделирование: учебное пособие. Часть I. СПб.: НМСУ «Горный», 2013. 176 с.
4. Шаталова О.М. Оценка эффективности технологических инноваций методами нечеткого моделирования: содержание модели и средства программной реализации // Вестник Удмуртского университета. Серия «Экономика и право». 2019. № 5. С. 609–620.
5. Волкова Е.С., Гисин В.Б. Нечеткие множества и мягкие вычисления в экономике и финансах: учебное пособие. Изд. 2-е. М.: Финансовый университет, 2016. 184 с.
6. Афанасьева О.В., Колесниченко С.В. Теоретические аспекты оценки технического уровня электро-механических комплексов // Записки Горного института. СПб.: СПГУ, 2018. Т. 230. С. 167–175.
7. Железнов Э.Г., Колесниченко С.В., Комиссаров П.В. Вопросы формирования концепции адаптивизации для исследования сложных эргатических систем // Вопросы современной науки: проблемы, тенденции и перспективы: сборник публикаций научного журнала «Chronos» по материалам XXXVI международной научно-практической конференции. М.: Научный журнал «Chronos», 2019. С. 137–142.
8. Теория систем и системный анализ в управлении организациями: Справочник: учеб. пособие / Под ред. В.Н. Волковой и А.А. Емельянова. М.: Финансы и статистика; ИНФРА – М, 2009. 848 с.
9. Автоматизация синтеза и обучение интеллектуальных систем автоматического управления / Отв. ред. И.М. Макаров, В.М. Лохин; Отд-е информ. технологий и вычисл. систем РАН. М.: Наука, 2009. 228 с.
10. Сазонов А.Е., Осипов Г.С., Клименко В.Д. Использование метода экспертных отношений предпочтения для оценки уровня совершенствования системы управления безопасностью морского судна // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С.О. Макарова. 2013. № 3(19). С. 94–104.
11. Осипов Г.С., Сазонов А.Е. Нечеткая экспертная система оценки уровня безопасности судоходных компаний // European research. 2016. №3 (14). С. 10–11.