

УДК 681.51.015+004.942

МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ КОЛЛЕКТИВА ОПЕРАТОРОВ В ПРОЦЕССЕ УПРАВЛЕНИЯ ТЕХНИЧЕСКОЙ СИСТЕМОЙ

М. Я. Брагинский, Д. В. Тараканов

Сургутский государственный университет, mick17@mail.ru, sprtdv@mail.ru

Квалификация оператора в процессе управления технологическим процессом является одним из важнейших факторов безопасного производства. Повышение уровня подготовки операторов происходит, как правило, на профильных курсах подготовки операторов с использованием специальных тренажеров, моделирующих технологический процесс с помощью аппаратных и программных средств. Такие тренажеры имеют довольно высокую стоимость и не учитывают всех факторов человеко-машинного взаимодействия.

Предлагаемая концепция тренажера предполагает разработку комплексного тренажера для тренировки коллектива операторов, управляющих сложным технологическим процессом (например, многоступенчатым процессом нефтепереработки). Функционирование разрабатываемого тренажера должно происходить с применением визуального моделирования производства посредством мнемосхем, предоставляющих оператору необходимую информацию, а также поддержки операторов при принятии решений с помощью индикаторов, звуковых сигналов и информационных сообщений. Для анализа качества коллективной работы операторов предполагается оценивание с помощью временных параметров взаимодействия операторов друг с другом и критериев качества управления.

Ключевые слова: компьютерный тренажер, человек-оператор, модель.

SIMULATION OF HUMAN OPERATORS GROUP INTERACTION DURING THE CONTROL OF INDUSTRIAL SYSTEM

M. Ya. Braginsky, D. V. Tarakanov

Surgut State University, mick17@mail.ru, sprtdv@mail.ru

The qualification of a process control operator is one of the most important factors of safe production. Professional operator training courses give the opportunity to improve the operating efficiency, productivity, and skills using special simulators that imitate technological processes with the help of special hardware and software. Such simulators have high cost and do not take into account all factors of human-machine interaction.

The proposed simulator concept involves the development of a complex simulator for training a team of control operators (for example, operators of a multi-stage oil refining process). Simulations should be performed with a visual simulation of the production by mnemonic diagrams, providing operators with the necessary information, as well as supporting them in decisions making using indicators, audio signals and information messages. Time parameters of operators' interaction and criteria of quality control are assumed to be estimated to analyze the quality of operators' teamwork.

Keywords: computer simulator, human-operator, model.

Введение. При функционировании современных производственных автоматизированных комплексов и систем возникает множество сложных задач, среди которых наиболее ответственной является задача обеспечения эффективного взаимодействия группы операторов с остальными подсистемами [1–3]. Помимо того, что человек-оператор решает сложные задачи по управлению производственным процессом, он также должен корректно и своевременно взаимодействовать с остальными операторами. Таким образом, действия человека-

оператора влияют на следующие показатели: качество, быстродействие и надежность функционирования автоматизированной производственной системы в целом.

Для решения задачи повышения эффективности человека-оператора широко используют компьютерные тренажеры [4–6]. При построении компьютерных тренажеров центральным вопросом является задача синтеза математической модели технической компоненты системы и построение адекватной модели поведения человека-оператора (или группы операторов) при формировании управляющих воздействий. Целью данной работы является построение аналитико-имитационной модели работы группы операторов.

В представленной работе авторами статьи предлагается использовать комбинированный подход к моделированию группы операторов, основанный на имитации параллельных взаимодействующих процессов управления между операторами с помощью Е-сетевого аппарата (модификации сетей Петри [7–10]), а также аппарата нечеткой логики для вычисления значений вектора управляющих воздействий.

Моделирование управления объектом. Покажем функционирование коллектива операторов в общем случае на Е-сетевой модели. Е-сетевая модель взаимодействия N операторов в процессе управления сложным технологическим объектом представлена в виде Е-сетевой структурной схемы на рис. 1.

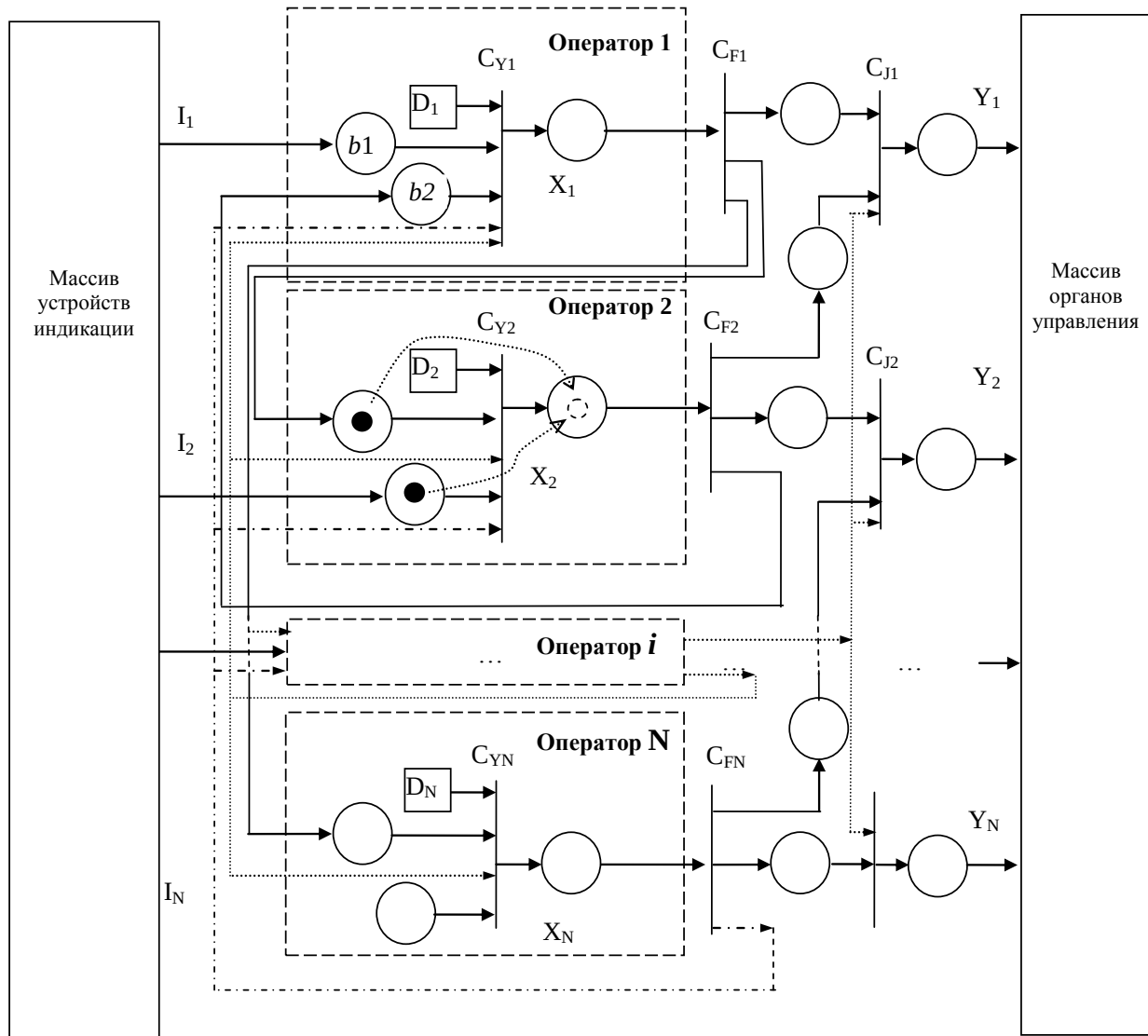


Рис. 1. Е-сетевая модель взаимодействия N операторов в процессе управления сложным технологическим объектом

В этой модели коллектив из N операторов, занятых деятельностью по управлению техническим объектом, получает информацию из массива устройств индикации I и воздействует на массив органов управления Y . Каждый i -й оператор получает свой индивидуальный набор информационных сигналов I_i из общего массива устройств индикации количеством K . Такое соответствие будет описываться матрицей I размером $(N \times K)$, где каждый элемент ind_{ij} показывает принятие информации i -м оператором от j -го устройства индикации. В случае принятия информационных сигналов i -м оператором от j -го устройства индикации этот элемент принимает значение единицы, в противном случае – ноль.

Для управления техническим объектом существует пакет заданий, описываемый матрицей-строкой из N элементов – $(D_1, D_2, \dots, D_N)$, из которого i -й оператор получает свое индивидуальное задание D_i , в соответствии с которым оператор осуществляет свою деятельность. На структурной схеме, показанной на рис. 1, данное задание учитывается в условии C_Y .

При очередном принятии решения i -м оператором, моделируемым Е-сетевым переходом X_i , этот оператор получает информацию о решениях, принятых ранее остальными операторами, что на схеме учитывается в условии C_Y . В свою очередь, другие операторы получают уведомления о принятом i -м оператором решении (что в данной Е-сети моделируется условием C_F), и в случае поступления (регистрации) подтверждения действий с их стороны (которые на схеме учитываются условием C_j) срабатывает переход Y_i , означающий воздействие на набор органов управления U_i i -го оператора.

Начальная маркировка Е-сетевой модели $M_0 = \{m_1, m_2, \dots, m_N\}$ генерируется массивом устройств индикации и содержит значения информационных сигналов, входных по отношению к группе операторов. Кроме того, в процессе инициализации имитационной модели необходимо в Е-сети задать начальный массив функционального состояния группы операторов (набор индивидуальных физико-биологических параметров человека-оператора) [11–13]. В качестве характеристик используется функциональная зависимость времени реакции человека-оператора от продолжительности работы T и уровня сложности работы $t_{oi} = f(T, Complex)$, а также вероятность безотказной работы оператора $P_{er} = f(T)$ [14–15].

На рис. 2 представлен пример аппроксимации вероятности безотказной работы человека-оператора для управления теплоэнергетической системы (штатный режим управления).

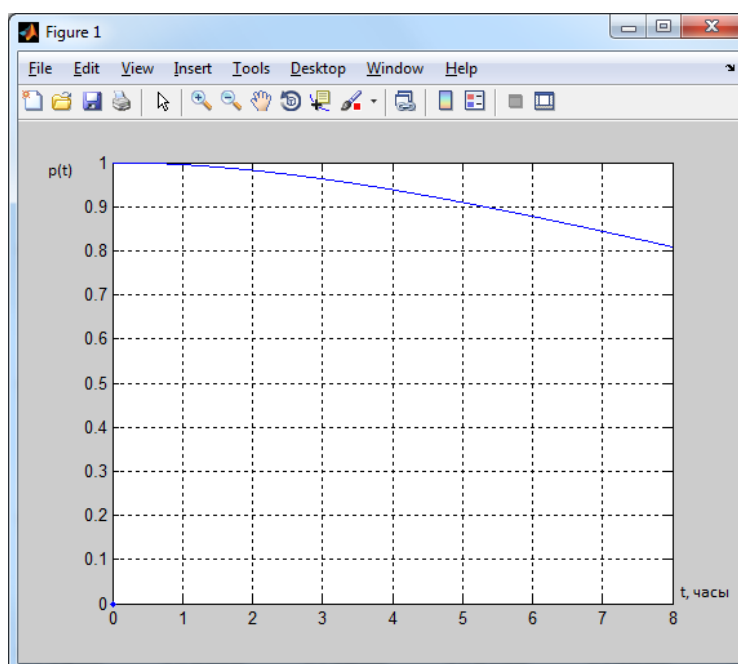


Рис. 2. Вероятность безотказной работы человека-оператора

Во входных позициях сети C_Y необходимо задать начальную маркировку состояния оператора. Протокол работы и взаимодействия операторов задается в условном переходе D_i .

Совокупность переходов C_{Yj} моделируют деятельность каждого человека-оператора. Срабатывание переходов C_{Yj} осуществляется за время t_{oi} при наличии фишек во входных позициях $I(C_Y)$, атрибуты которых содержат информацию о состоянии устройств индикации и принятых решениях соседних операторов. После срабатывания перехода C_Y фишка заносится в выходную позицию.

Работу первого оператора можно отобразить следующим образом:

$$M_{01} \mid C_{Y1} \mid M_{02},$$

где M_{01} – исходная разметка, которая соответствует начальному вектору состояния системы $M_{01} = \{1, 1, \dots, 1, 0\}$. Фишки вначале находятся во входных позициях b перехода C_{Y1} . Атрибуты фишки в позиции b_1 содержат информацию от устройства индикации, остальные атрибуты содержат данные и команды от других операторов. При выполнении условия срабатывания через интервал t_{oi} происходит смена маркировки перехода C_{Y1} : фишки из входных позиций перехода C_{Y1} изымаются и помещаются в выходную позицию X_1 . Тогда $M_{02} = \{0, 0, \dots, 0, 1\}$. Атрибуты фишки $Atr = \{atr_1, atr_2, \dots, atr_n\}$ содержат параметры управляющего воздействия каждого человека-оператора. Для описания всей человеко-машинной системы управления предлагается использовать двухуровневую модель принятия командных решений, в которой верхний уровень содержит нечеткую логико-динамическую модель формирования управляющих воздействий, а нижний уровень модели представлен математическими моделями функционального состояния человека-оператора [16–17].

Для моделирования управляющих воздействий группы операторов предлагается использовать математический аппарат нечеткой логики [18]. Это необходимо для формализации процесса управления человека-оператора.

Для учета взаимосвязей между входными параметрами системы управления необходимо сформировать базу нечетких продукционных нечетких правил $R: X \rightarrow Y$.

Перечень входных параметров определяется кортежем $R = \{R_1, R_2, \dots, R_n\}$. F задает совокупность нечетких функций, которые определяют управляющее воздействие. Значение контролируемых переменных технической системы целесообразно представить в виде лингвистической переменной. Будем ассоциировать с подмножеством R_1 уровень входного параметра, $R_1 = \{R_1^1 = \text{«низкий»}, R_1^2 = \text{«средний»}, R_1^3 = \text{«высокий»}\}$. Для построения более точной модели можно использовать модальность высказывания, например, «очень большое давление».

На рис. 3 представлены графически функции принадлежности, где $f_{R_1}(x)$ соответствует функции принадлежности с низким уровнем регулируемой величины, $f_{R_2}(x)$ и $f_{R_3}(x)$ соответствует функции принадлежности со средним и высоким уровнем регулируемой величины.

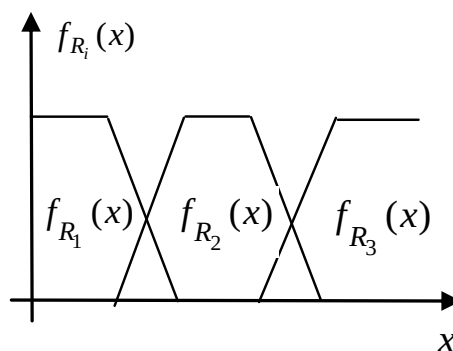


Рис. 3. Функции принадлежности регулируемой величины

Формирование управляющих воздействий операторами формализуется с помощью правила вида: Rule_i: if $x_1 = R_1 \wedge x_2 = R_2 \wedge \dots$, then $y_1 = B_1 \wedge y_2 = B_2$.

Нечеткая схема вывода управляющего воздействия представлена на рис. 4.

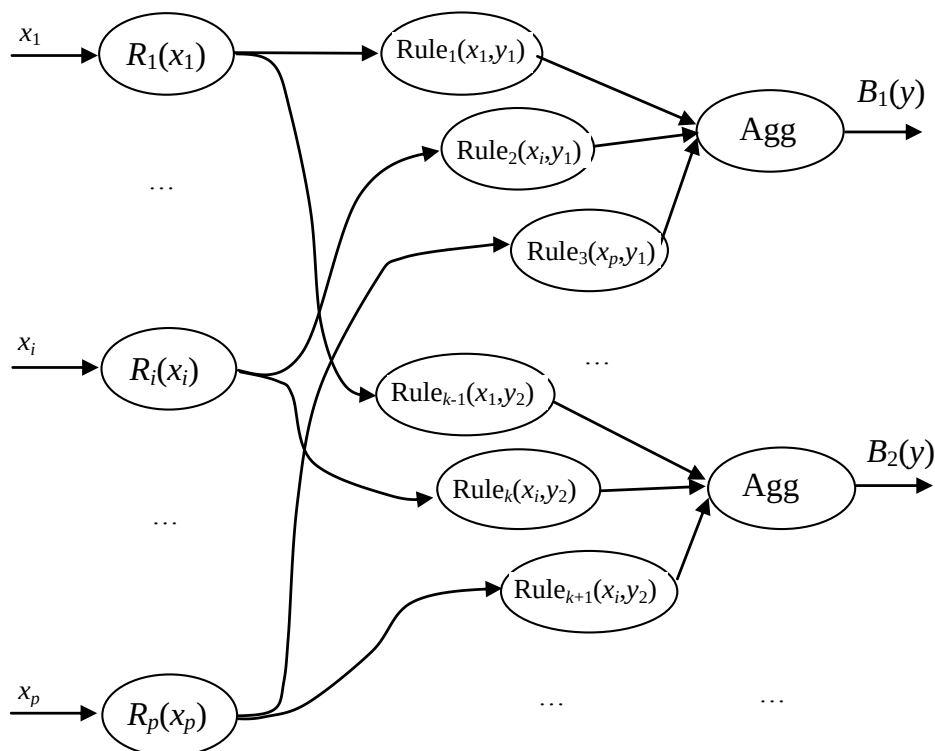


Рис. 4. Нечеткая схема логического вывода модели управления

На первом этапе нечеткого вывода осуществляется активизация правил нечеткого вывода $R_i(x_i)$. Далее на основании базы правил формируется нечеткое отношение $Rule_k(x_i, y_j)$ с полученными промежуточными результатами $B(y)$. Процедура агрегирования Agg формирует выходное нечеткое подмножество управления человека-оператора.

В качестве входных переменных используется массив входных физических переменных и регулируемых величин. На основании входных данных происходит вычисление степени истинности суждения каждой нечеткой (лингвистической) переменной.

На основании нечетких продукционных правил осуществляется активизация функций принадлежности $\mu(y)$ и процедура дефаззификации как вычисление «центра массы» [19–20]:

$$y' = \frac{\int_{y_{\min}}^{y_{\max}} y \mu_B(y) dy}{\int_{y_{\min}}^{y_{\max}} \mu_B(y) dy}.$$

Полученные значения управляющих воздействий заносятся в качестве значения атрибута фишки (маркера) Е-сетевой схемы и далее – в массив органов управления (рис. 1) [21–22].

Требования к экранной части симулятора. Объект управления должен представляться на мониторах операторов в виде мнемосхемы с изображением технологического объекта и всех элементов, входящих в состав системы управления объектом. Цвет фона основного окна тренажера должен быть выполнен либо в градациях серого, либо любым другим цветом, удовлетворяющим следующему набору требований:

- не вызывает раздражения и усталости глаз;
- не отвлекает от изображения мнемосхемы;

- не сливается с различными вспомогательными элементами схемы и тренажера, вне зависимости от их состояния.

В рабочей области мнемосхемы также должны быть представлены (реализованы):

1. Средства вывода значений ключевых параметров объекта.
2. Отображение пороговых (минимальных и максимальных) значений ключевых параметров объекта.
3. Штатные средства индикации аварийных и предаварийных состояний объекта и элементов системы.
4. Индикаторы средств оказания воздействия на ключевые элементы управления технологическим объектом.
5. Область выбора параметров, для которых будет осуществляться генерация значений.
6. Поясняющие надписи.
7. Элементы управления работой симулятора.
8. Индикаторы для анализа, располагающиеся в левой части экрана сверху вниз в следующем порядке:

- а) состояние системы (желтый – предаварийное; красный – аварийное);
- б) наличие сигнала оператору;
- в) режим управления (автоматический, ручной);
- г) индикатор правильности нажатия оператором управляющей клавиши (зеленый – правильная реакция; красный – ошибочная реакция).

Средства вывода значений ключевых параметров объекта должны быть представлены в виде прямоугольных полей с белым фоном. Размер поля должен быть достаточным для отображения четырехзначного числа. В данных полях с заданной периодичностью будет отображаться значение отслеживаемого параметра. Размер текста должен быть не менее 14 пт, гарнитура Times New Roman или Arial, цвет текста – черный. Указанная область должна располагаться справа и/или сверху относительно изображения элемента (например, котла), к которому относится отображаемый параметр.

На мнемосхеме также должны быть показаны пороговые значения (уставки) ключевых параметров объекта. Отображение пороговых значений объекта должно быть представлено в виде текста, имеющего размер не менее 14 пт, гарнитура Times New Roman или Arial, который располагается в области, имеющей прямоугольную форму, залитую белым фоном, рядом с отслеживаемым параметром. Данная область не должна отвлекать внимание от наблюдаемого параметра, но при этом располагаться недалеко от его изображения. Отображение пороговых значений осуществляется заданными цветами, например, максимальное значение – красным, минимальное – синим.

Заключение. Таким образом, полученная математическая модель включает в себя две основные компоненты: Е-сетевую схему, моделирующую логико-динамические процессы взаимодействия группы операторов и нечеткую схему вывода, которая позволяет учитывать особенности человеческого мышления для формирования управляющих воздействий на основании полученной информации с регистрирующих приборов.

Литература

1. Baron S., Kruser D. Quantitative modeling of human performance in complex, dynamic systems. Washington, DC: National Academies Press, 1990. 96 p.
2. Дружинин Г. В. Учет свойств человека в моделях технологий. М. : МАИК Наука/Интерпериодика, 2000. 237 с.
3. Sheridan T. Humans and Automation: System Design and Research Issues, John Wiley and Sons, 2002. 261 p.
4. Брагинский М. Я., Тараканов Д. В. Построение многофункционального тренажера по управлению теплоэнергетической системой // Вестник кибернетики. 2018. № 2 (30). С. 161–168.

5. Дозорцев В. М. и др. Интерфейс полевого оператора в компьютерном тренажере: 3D погружение или 2D панорама? // Человеческий фактор в сложных технических системах и средах : II Междунар. науч.-практич. конф. (Эрго-2016). СПб., 2016. С. 268–276.
6. Осипов В. А., Даныкина Г. Б. Повышение эффективности обучения операторов технологических процессов на базе компьютерных тренажеров // Системы. Методы. Технологии, 2011. С. 106–114.
7. Суконщиков А. А., Крюкова Д. Ю. Нейроподобные сети Петри при моделировании социальных процессов // Программные продукты и системы. 2011. № 2. С. 25–30.
8. Leclercq E. et al. Petri nets design based on neural networks. ESANN 2008, 16th European Symposium on Artificial Neural Networks, Bruges, Belgium, April 23–25, 2008, Proceedings. P. 529–534.
9. Сочнев А. Н. Оптимизация функционирования систем с использованием нейросетевых моделей сетей Петри // Мат. моделирование. 2014. Т. 26, № 4. С. 119–128.
10. Peterson J. Petri net theory and the modeling of systems. Prentice-Hall, 1981. 290 p.
11. Брагинский М. Я., Бурькин Ю. Г., Тараканов Д. В. Моделирование человеко-машинных систем с учетом влияния световых стимулов на человека-оператора // Вестник кибернетики. 2016. № 1. С. 63–73.
12. Braginsky M. Ya., Tarakanov D. V., Tsapko S. G. Hierarchical analytical and simulation modelling of human-machine systems with interference // Journal of Physics: Conference Series. 2017. Vol. 803 : Information Technologies in Business and Industry (ITBI2016) : International Conference, 21–26 September 2016, Tomsk, Russian Federation. P. 120–126.
13. Брагинский М. Я., Тараканов Д. В. Е-сетевое иерархическое моделирование произвольных и непроизвольных движений человека-оператора с помощью параметрической нейросетевой идентификации // Вестник кибернетики. 2017. № 3 (27). С. 19–25.
14. Antonella Petrillo, Fabio De Felice, Francesco Longo, Agostino Bruzzone. Factors affecting the human error: representations of mental models for emergency management. Journal: International Journal of Simulation and Process Modelling. Vol. 12. № 3/4. 2017. P. 287–299.
15. Sanfilippo F. A multi-sensor fusion framework for improving situational awareness in demanding maritime training // Reliability Engineering & System Safety. May 2017. Vol. 161. P. 12–24.
16. Пупков К. А., Устюжанин А. Д. Идентификация и оценка обученности в динамических человеко-машинных системах // Вестник МГТУ им. Н. Э. Баумана. Сер. Приборостроение. 2003. № 4. С. 95–103.
17. Дозорцев В. М. Обознов А. А. Имитационное моделирование как инструмент экспериментально-психологических исследований // Имитационное моделирование. Теория и практика (ИММОД-2015). 2015. С. 34–48.
18. Круглов В. В., Дли М. И. Интеллектуальные информационные системы: компьютерная поддержка систем нечеткой логики и нечеткого вывода. М. : Физматлит, 2002. 256 с.
19. Braginsky M. Ya., Tarakanov D. V., Tsapko S. G. E-Network Modelling of Process Industrial Control Systems in Building Computer Simulators [Electronic resources] // Control and Communications (SIBCON) : Proceedings of the XII International Siberian Conference. Moscow, May 12–14. 2016. P. 185–191.
20. Бусленко Н. П. Моделирование сложных систем. М. : Наука, 1978.
21. Best E., Fernandez C. Non-sequential Processes, a Petri Net View // EATCS Monographs on Theoretical Computer Science. Berlin: 1988. № 13.
22. Dozortsev V., Nazin V., Obznov A., Gutsykova S., Mironova A. Evaluation of the Process Operator Knowledge Formation Resulting from Computer-Based Training // In Proceedings of the ECEC'2015-EUROMEDIA'2015-FUBUTEC'2015 Conference. Lisbon, Portugal, April 27–29, 2015. P. 118–123.