

## Нечеткая биотехническая система управления производительностью человека-оператора

### Аннотация

Представлена нечеткая биотехническая система управления производительностью оператора с обратной связью на основе ведущего типа восприятия информации и эмоций. Она является неинвазивной и применяется круглосуточно с целью контроля у человека-оператора состояний утомления, сонливости и др. В кратком виде представлены факторы, влияющие на производительность оператора, составляющие производительности, проблемы диагностики и управления психоэмоциональными состояниями, результаты диагностики этих состояний по динамике манипуляций устройствами управления курсором, описание разработанной системы, регрессионный и нечеткий подходы к диагностике производительности.

### Введение

Различные аспекты производительности человека-оператора в последнее время исследуются учеными [1]-[5], однако проблема управления производительностью полностью не решена.

Пульты представителей профессий, включающих в себя понятие «человек-оператор»: сотрудника дежурной части, системного администратора, оператора-проектировщика, оператора реакторного отделения на АЭС, командира расчета и т. п., – в настоящее время оснащены устройствами типа сенсорная панель, мышь, клавиатура. Подобные устройства являются наиболее простыми и наименее экономически затратными для обработки поступающих с них биометрических данных в сравнении с электрокардиографами, устройствами для съема данных сопротивления кожи, фотоплетизмографами [1], [6], [7] и др.

Производительность оператора колеблется в течение суток из-за влияния разных факторов: времени суток, усталости, наличия нестандартных ситуаций, эмоциональных состояний и др. Исследование [7] позволило сделать вывод, что в состоянии радости пользователи быстрее управляют мышкой и печатают текст, чем в нейтральном состоянии. В работе [1] обоснована целесообразность использования динамики манипуляций мышкой для диагностики производительности оператора.

**Цель работы** – разработка нечеткой биотехнической системы (НБТС) управления производительностью человека-опе-

ратора по данным динамики манипуляций устройствами управления курсором (ДМУУК).

### НБТС управления производительностью оператора

По данным исследования [4], на производительности работ, выполняемых оператором, отражаются длительность восприятия исходной информации, длительность умственной работы и длительность физических действий, направленных на выполнение этой работы. Отрицательные эмоции, нервно-психическое напряжение снижают эффективность кровообращения в головном мозге и ухудшают умственную деятельность. Следовательно, стимуляция/ введение в «нужные» психоэмоциональные состояния (ПЭС) способствуют повышению производительности работы операторов. В настоящее время управление ПЭС проводится медикаментозно, методами саморегуляции или при помощи дорогостоящих и инвазивных методов типа транскраниальной магнитной стимуляции. Диагностика эмоций не всегда точна из-за имеющихся проблем, рассмотренных в работе [8].

Пусть критериями производительности  $P$  являются точность  $z_1$  и скорость  $z_2$  выполнения задач человеком-оператором, определяемых по соответствующим информативным признакам ДМУУК: максимальной кривизне кривой, описываемой указателем при перемещении мыши –  $k$  [1/пиксел], и общему времени управления мышью –  $t$  [мс] (см. пример выборки в табл. 1,  $k$  и  $t$  получены при работе с интерфейсом, представленном в [1]). Представленные два информативных признака показывают статистически значимые изменения ДМУУК в

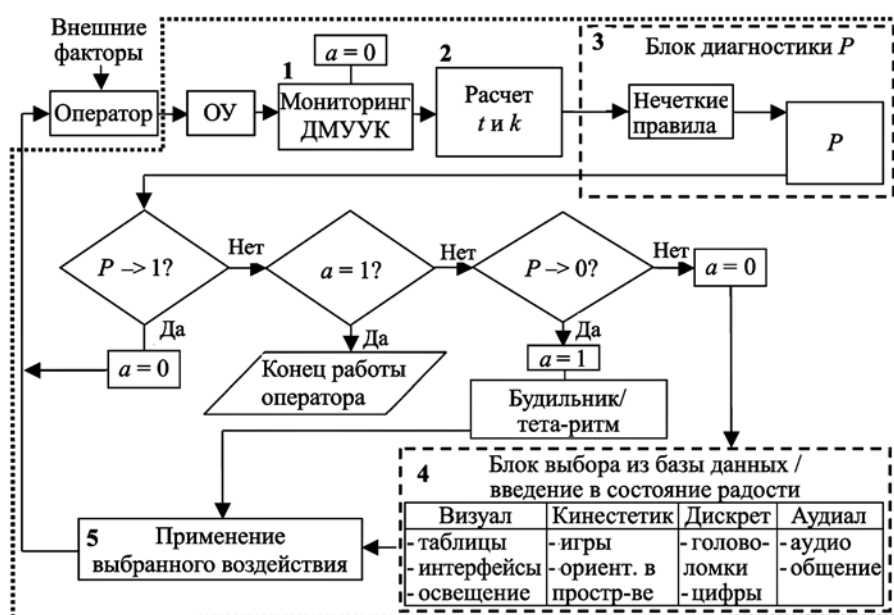


Рис. 1. НБТС управления производительностью оператора

зависимости от применимых воздействий [7]. Для нахождения  $k$  используется выражение

$$k = \max \{ |k_i| \} = \max \left\{ \left| \frac{vx_i \cdot ay_i - vy_i \cdot ax_i}{\sqrt{(vx_i)^2 + (vy_i)^2}} \right| \right\},$$

где

$$vx_i = \frac{x_i - x_{i-1}}{t_i - t_{i-1}}; \quad vy_i = \frac{y_i - y_{i-1}}{t_i - t_{i-1}};$$

$$ax_i = \frac{vx_i - vx_{i-1}}{t_i - t_{i-1}}; \quad ay_i = \frac{vy_i - vy_{i-1}}{t_i - t_{i-1}};$$

$\{x_i\}$  и  $\{y_i\}$  – координатные массивы положения курсора на экране монитора, полученные при управлении курсором мышкой в текущий ( $i$ ) и предыдущий момент ( $i - 1$ ) времени;  $\{t_i\}$  – временной массив, соответствующий этим положениям.

Критерии  $z_1$  и  $z_2$  сводятся к минимуму при совершенствовании оператором своих навыков управления мышью, т. е. при  $x_i - x_{i-1} \rightarrow 0$  и  $y_i - y_{i-1} \rightarrow 0$ . То есть чем меньше лишних движений делает оператор, тем они точнее (если курсор движется по прямой –  $k = 0$ ) и быстрее ( $t \rightarrow \min$ ), тем выше производительность.

НБТС управления производительностью работы оператора представлена на рис. 1. Человек-оператор выступает в качестве объекта управления (ОУ), а техническая система – в качестве управляющего программного объекта (УО). Рассмотрим пять классов производительности  $P$  [в долях ед.]:  $p_5$  – производительность в норме;  $p_4$  – кураж;  $p_3$  – транс (снижена);  $p_2$  – аффект;  $p_1$  – сон (производительность крайне низкая).

В результате мониторинга работы оператора с ОУ считаются его биометрические данные (рис. 1, блок 1): координатные  $X = \{x_i\}$ ,  $Y = \{y_i\}$  и временной  $T = \{t_i\}$  массивы. Затем в блоке 2 рассчитываются  $k$  и  $t$  (рис. 2а), которые поступают в блок 3, где происходит диагностика  $P$  по нечетким правилам (табл. 2). Флажок  $a$  (в начале работы оператора равен нулю) вводится для отслеживания крайних низких уровней производительности оператора: «сон» и «аффект» на рис. 2б. Если в блоке 3  $P$  классифицируется как «сон» или «аффект», то  $a = 1$  и УО в качестве управляющего воздействия предьявляет прослушивание звонка будильника или тета-ритмы длительностью 1 мин соответственно.

Если после оказанного на него воздействия оператор не выходит из крайне низкого состояния производительности, то УО отстраняет его от работы, поскольку «аффект» может сигнализировать, например, о серьезной проблеме со здоровьем. Работа УО описывается выражением (1)

$$\text{УО: } \begin{cases} a = 0, \text{ блок 1, if } P \in \{p_5\}; \\ a = 1, \text{ будильник/тета-ритм, if } P \in \{p_2 \vee p_1\}; \\ \text{блок 4, if } P \in \{p_4\}; \\ \text{введение в ПЭС радости, if } P \in \{p_3\}. \end{cases} \quad (1)$$

Если  $P$  снижается и оператор находится в состоянии «кураж» (рис. 2б), то для подбора более эффективной обратной связи, приведении  $P$  к норме подбирается управляющее воздействие из базы данных, построенной на модальности вос-

приятия информации [9] (рис. 1, блок 4). Если оператор-дискрет испытывает снижение производительности, то УО переключается на работу с цифрами. Оператору-визуалу УО изменяет интерфейс взаимодействия. Если  $P$  уменьшается ввиду усталости или сильного расслабления (рис. 2б – «транс»), то УО стимулирует введение в ПЭС радости при помощи индукции этой эмоции, подкрепленной соответствующим аудиовизуальным воздействием.

Кроме ДМУУК, при диагностике  $P$  в блоке 3 целесообразно использовать данные, полученные от резистивной сенсорной панели, а регистрацию двигательной активности человека осуществлять при помощи электродов [10]. Как правило, для оценки прогнозирования работы оператора используются регрессионные или нечеткие модели [11]. При этом их оценка осуществляется на основе значения средней квадратичной ошибки RMSE (root mean square error). Наилучшей признается та модель, у которой значение RMSE минимально.

### Регрессионная модель диагностики производительности оператора

Линейная регрессионная модель производительности рассчитана на основе данных, приведенных в табл. 1 (рис. 5в):

$$P = 2,566 - 0,121z_1 - 0,0018z_2. \quad (2)$$

Таблица 1

Выборка протоколов работы оператора

$z_1$	$z_2$	$P$	$z_1$	$z_2$	$P$	$z_1$	$z_2$	$P$
0,4702	986	0,9	2	1025	0,5	4	1148	0,1
0,47	954	0,9	1,1735	986	0,7	2,4749	1071	0,1
1,0217	986	0,8	2	977	0,5	4,5018	1181	0,1
0,25	907	1	1,95	1009	0,5	3,5355	1165	0,2
1	923	1	1,5574	1025	0,5	3,2998	1071	0,4
0,4715	891	1	1,9575	1040	0,6	3,2512	1134	0,1
0,0122	876	1	1,0606	986	0,5	3	1040	0,3

Здесь коэффициент детерминации  $R^2 = 0,87$  является значимым по  $F$ -критерию Фишера ( $F = 60,74$  при уровне значимости  $10^{-8}$ ). Производительность достигает максимума, т. е.  $P = 1$ , на множестве значений  $z_1$  и  $z_2$ , например  $P \rightarrow \max$  при  $z_1 = 1$  и  $z_2 = 826$  или  $z_1 = 0$  и  $z_2 = 895$ .

### Нечеткая модель диагностики производительности

Фазификация входных переменных подбирается по 72 образцам ДМУУК. Они задаются треугольными функциями принадлежности  $t = [t_1] + [t_2] + [t_3]$  (рис. 3а) и  $k = [k_1] + [k_2] + [k_3]$  (рис. 3б). Работы специалистов в области нечеткой логики принятия решений [1], [2], [5], [12], [13] показывают, что при нечеткой структуре классов и разнотипности информативных признаков оправдано применение треугольных функций принадлежности.

Выходная лингвистическая переменная  $P$  – производительность человека-оператора (рис. 4) – принимает пять термов, которые описаны выше как классы  $P$ :  $P = [p_1] + [p_2] + [p_3] + [p_4] + [p_5]$ .

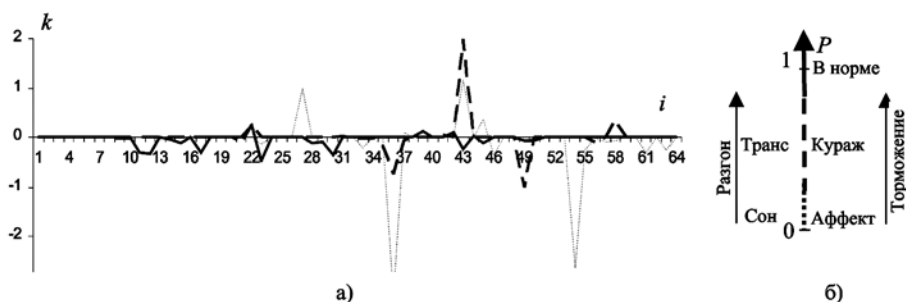


Рис. 2. Классы уровней производительности оператора: а) при изменении признака производительности; б) компенсация производительности оператора; - - - - кураж; ... - аффект; — — — — производительность в норме

Общий вид треугольной функции принадлежности

$$f(x; a, b, c) = \begin{cases} 0, & x \leq a; \\ \frac{x-a}{b-a}, & a \leq x \leq b; \\ \frac{c-x}{c-b}, & b \leq x \leq c; \\ 0, & c \leq x, \end{cases} \quad (3)$$

где  $a, b, c$  – параметры функции принадлежности;  $x$  – количественное значение входного параметра по оси абсцисс.

В табл. 2 приведены правила нечеткой модели вида «Если ... То».

Таблица 2

**Нечеткая база знаний**

НП	Если	То	НП	Если	То	НП	Если	То			
НП <sub>1</sub>	$k_1$	$t_1$	$\rho_5$	НП <sub>4</sub>	$k_2$	$t_1$	$\rho_4$	НП <sub>7</sub>	$k_3$	$t_1$	$\rho_3$
НП <sub>2</sub>	$k_1$	$t_2$	$\rho_4$	НП <sub>5</sub>	$k_2$	$t_2$	$\rho_3$	НП <sub>8</sub>	$k_3$	$t_2$	$\rho_2$
НП <sub>3</sub>	$k_1$	$t_3$	$\rho_3$	НП <sub>6</sub>	$k_2$	$t_3$	$\rho_2$	НП <sub>9</sub>	$k_3$	$t_3$	$\rho_1$

Далее формируется матрица нечетких отношений (табл. 3).

При составлении матрицы нечетких отношений учитывается подход, предложенный в работах [14], [15]. В матрице нечетких отношений для нахождения нечеткого минимума и максимума могут использоваться как жесткие, так и мягкие арифметические операции [16], [17]:

$$\min_{soft}(k_1, t_1) = \frac{k_1 + t_1 + \delta^2 - \sqrt{(k_1 - t_1)^2 + \delta^2}}{2}, \quad (4)$$

где  $\delta = 0,05$ .

Мягкий максимум в табл. 2 вычисляется с помощью выражения

$$\max_{soft}(b_2, b_4) = |\gamma \cdot \max(b_2, b_4) + 0,5(1 - \gamma)(b_2, b_4)|, \quad (5)$$

где  $\gamma$  – оператор параметризации: при  $\gamma = 1$  формула сводится к операции жесткого максимума, при  $\gamma = 0$  формула сводится к операции среднего арифметического (MEAN).

Формула (3) может применяться только к двух операндам; если число операндов больше двух, то рекомендуется использовать следующее выражение:

$$\text{MAX}_{soft}(b_3, b_5, b_7) = \max_{soft}(v_1, b_7), \quad (6)$$

где  $v_1 = \max_{soft}(b_3, b_5)$ .

После составления матрицы нечетких отношений выполняется операция усечения термов выходной переменной

$$\mu(p)_i = \text{soft} \min_{i=1}^n [p_i; \mu(p)], \quad (7)$$

где  $i = 1 \dots n$  – номер заключения нечетко-логического вывода;  $n$  – количество заключений нечетко-логического вывода.

Таблица 3

**Матрица нечетких отношений**

Выходной терм	Композиция			Максимум
$\rho_5$	$b_1 = \text{soft-min}(k_1; t_1)$	–	–	$b_1$
$\rho_4$	$b_2 = \text{soft-min}(k_1; t_2)$	$b_4 = \text{soft-min}(k_2; t_1)$	–	$\text{soft-max}(b_2, b_4)$
$\rho_3$	$b_3 = \text{soft-min}(k_1; t_3)$	$b_5 = \text{soft-min}(k_2; t_2)$	$b_7 = \text{min}(k_3; t_1)$	$\text{soft-MAX}(b_3, b_5, b_7)$
$\rho_2$	$b_6 = \text{soft-min}(k_2; t_3)$	$b_8 = \text{soft-min}(k_3; t_2)$	–	$\text{soft-max}(b_6, b_8)$
$\rho_1$	$b_9 = \text{soft-min}(k_3; t_3)$	–	–	$b_9$

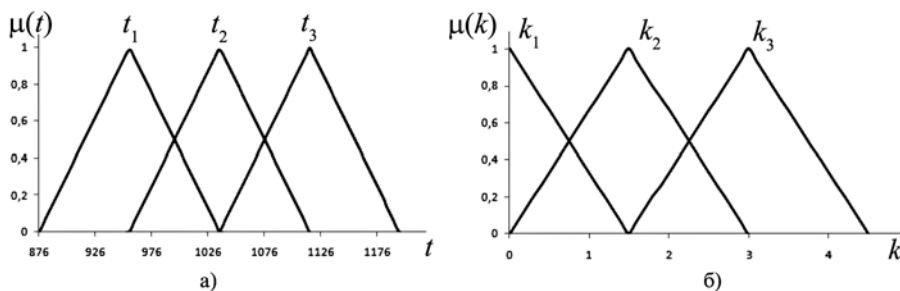


Рис. 3. Графики функций принадлежности: а) для входной переменной  $t$ ; б) для входной переменной  $k$

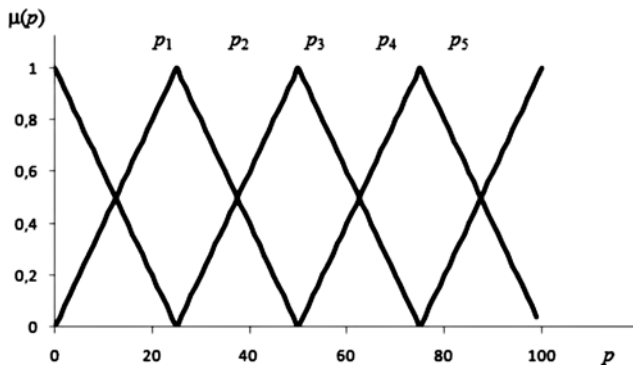


Рис. 4. График выходной функции принадлежности ( $p$  – в процентах)

Далее выполняется операция объединения усеченных термов выходной переменной

$$\mu(p)' = \text{soft} - \underset{i=1}{\overset{n}{\text{MAX}}} [\mu'(p)_1; \mu'(p)_2; \mu'(p)_3; \mu'(p)_4; \mu'(p)_5]. \quad (8)$$

На последнем шаге осуществляется дефаззификация четкого значения производительности на основе метода центра тяжести

$$P = \frac{\sum_{i=1}^n p_i \cdot \mu(p)'_i}{\sum_{i=1}^n \mu(p)'_i}. \quad (9)$$

## Результаты исследований

При помощи формул (3)-(9) на рис. 5 строятся результирующие поверхности модели производительности человека-оператора. Анализ результатов, представленных на рис. 5, показывает, что для жесткой модели нечеткого вывода характерна область нечувствительности, которая прослеживается при  $t = 876$ . При использовании мягкого нечеткого вывода появление подобных зон нечувствительности исключено.

Протестируем регрессионную (рис. 5в) и нечеткую (рис. 5б) модели диагностики  $P$  производительности оператора по выборке табл. 1 (см. рис. 6).

Анализ рис. 6 (по  $ox$  – номер в выборке) показывает, что точность диагностики  $P$  выше у нечеткой модели, чем у регрессионной. По средней квадратичной ошибке модели

$$RMSE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (P_i - \hat{P}_i)^2:$$

$$RMSE_{PM} = 0,01334; RMSE_{HM} = 0,0022,$$

т. е.  $RMSE_{HM} < RMSE_{PM}$ .

## Заключение

Разработанная НБТС управления производительностью оператора компенсирует по данным ДМУУК состояния крайне низкой и сниженной производительности, возникающие из-за усиления процессов торможения/возбуждения оператора, является неинвазивной, экономически выгодной и может использоваться тайно и круглосуточно.

Исследование нечеткой модели диагностики производительности оператора показывает, что при использовании в нечеткой модели мягких арифметических операций исключается появление зон нечувствительности, из-за которых традиционные нечеткие системы не обладают свойством аддитивности. На основе анализа показателя  $RMSE$  установлено, что мягкая нечеткая модель имеет преимущество по сравнению с регрессионной моделью в  $0,01334 / 0,0022 = 6,1$  раза.

## Список литературы:

1. Бобырь М.В., Скринникова А.В. Исследование адаптивной системы учета рабочего времени // Известия ЮЗГУ. Серия «Управление, выч. техника, информатика. Медицинское приборостроение». 2016. № 1 (18). С. 42-52.

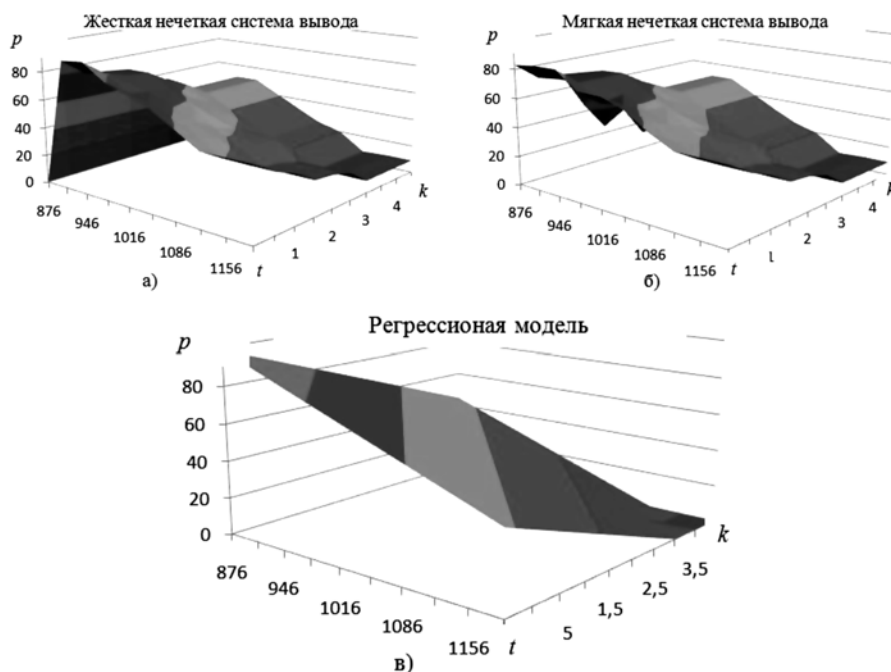


Рис. 5. Производительность человека-оператора при использовании: а) жестких арифметических операций; б) мягких арифметических операций; в) регрессионной модели

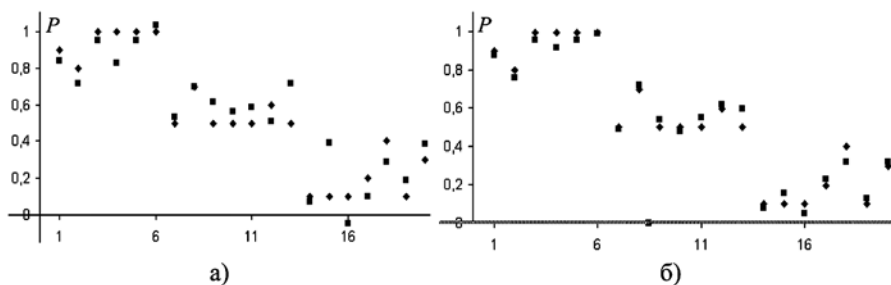


Рис. 6. Проверка моделей на тестовой выборке: а) регрессионная  $P = 2,566 - 0,121z_1 - 0,0018z_2$ ; б) нечеткая;  $\diamond$  – экспериментальные данные;  $\square$  – данные модели

2. *Титов В.С., Мишустин В.Н., Новиков А.В., Коровин Е.Н.* Классификация функциональных состояний и оценка уровня психоэмоционального напряжения и утомления на основе гибридных нечетких моделей // *Медицинская техника*. 2013. № 4. С. 11-13.
3. *Алпатов А.В., Кирюхин А.В.* Система поддержки водителя на основе анализа пульса и параметров движения транспортного средства // *Медицинская техника*. 2015. № 2. С. 29-34.
4. *Zhai S., Accot J., Woltjer R.* Human Action Laws in Electronic Virtual Worlds – An Empirical Study of Path Steering Performance in VR // *Teleoperators and Virtual Environments*. 2004. Vol. 13. № 2. PP. 113-127.
5. *Корневский Н.А., Гадалов В.Н., Коровин Е.Н., Серебровский В.И.* Оценка эргономичности биотехнических систем с помощью нечетких моделей Шортлифа // *Медицинская техника*. 2013. № 4. С. 4-6.
6. *Струнин Р.М.* Биотехническая система определения психоэмоционального состояния человека // *Технические науки*. Апрель 2016 / <http://research-journal.org/technical/biotexnicheskaya-sistema-opredeleniya-psychoemocionalnogo-sostoyaniya-cheloveka/> (дата обращения 26.04.16 г.).
7. *Скринникова А.В.* Изменение индивидуальной динамики манипуляций устройствами управления курсором под влиянием эмоций страха и радости // *Известия ЮФУ. Технические науки*. 2013. № 5. С. 246-251.
8. *Скринникова Г.В.* Модели эмоций: проблемы та рішення / *Материалы МНТК «САИТ 2011»*, Киев, 2011. – К.: ННК «ІПСА» НТУУ «КПІ», 2011. С. 310.
9. *Навалихина А.И.* Структура ассоциативного поля в условиях доминирования разных модальностей восприятия // *Вестник Челябинского гос. ун-та*. 2013. № 14 (305). С. 38-44.
10. *Chernova I.V., Sumin S.A., Bobyr M.V., Seregin S.P.* Forecasting and diagnosing cardiovascular disease based on inverse fuzzy models // *Biomedical Engineering*. 2016. Vol. 49. № 5. С. 263-267.
11. *Ротштейн А.П., Штовба С.Д.* Моделирование надежности человека-оператора с помощью нечеткой базы знаний Сугено // *Автоматика и телемеханика*. 2009. № 1. С. 180-187.
12. *Бобырь М.В., Кулабухов С.А., Титов Д.В.* Оценка влияния числа обучаемых точек на аддитивность нечетких систем // *Промышленные АСУ и контроллеры*. 2014. № 10. С. 30-35.
13. *Гадалов В.Н., Иванов В.А., Снопков В.Н., Серебровский В.И.* Прогнозирование и ранняя диагностика заболеваний на основе оценки функционального резерва организма человека с помощью гетерогенных нечетких моделей // *Медицинская техника*. 2013. № 4. С. 6-8.
14. *Емельянов С.Г., Титов В.С., Бобырь М.В.* Интеллектуальные системы на основе нечеткой логики и мягких арифметических операций / *Уч. пособие*. – М.: АРГАМАК-МЕДИА, 2014. 341 с.
15. *Бобырь М.В., Кулабухов С.А.* Дефаззификация вывода из базы нечетких правил на основе метода разности площадей // *Вестник компьютерных и информационных технологий*. 2015. № 9 (135). С. 32-41.
16. *Бобырь М.В., Кулабухов С.А., Милостная Н.А.* Обучение нейро-нечеткой системы на основе метода разности площадей // *Искусственный интеллект и принятие решений*. 2016. № 4. С. 15-26.
17. *Бобырь М.В., Милостная Н.А.* Анализ использования мягких арифметических операций в структуре нечетко-логического вывода // *Вестник компьютерных и информационных технологий*. 2015. № 7. С. 7-15.

*Максим Владимирович Бобырь,  
д-р техн. наук, профессор,  
кафедра вычислительной техники,  
ФГБОУ ВО «Юго-Западный  
государственный университет»,  
г. Курск,  
Анна Владимировна Скринникова,  
ст. преподаватель,  
кафедра фундаментальной математики,  
ГОУ ВПО ЛНР «Луганский  
государственный университет им. Т. Шевченко»,  
г. Луганск,  
Наталья Анатольевна Милостная,  
канд. техн. наук, ведущий научный сотрудник,  
Станислав Петрович Серегин,  
д-р мед. наук, профессор,  
кафедра биомедицинской инженерии,  
ФГБОУ ВО «Юго-Западный  
государственный университет»,  
г. Курск,  
e-mail: max\_b@mail333.com*

**С.Н. Саягин**

## **Принцип построения адаптивного мобильного пространственного реабилитационного робота-манипулятора на основе октаэдрального додекапода**

### **Аннотация**

Представлена новая концепция адаптивного мобильного пространственного реабилитационного робота-манипулятора параллельной структуры на основе октаэдрального додекапода. Описаны его конструктивные принципы и функциональные возможности, позволяющие автоматизировать процесс проведения массажа верхних и нижних конечностей, включая локтевые и коленные суставы, а также шею пациента.

Массаж эффективно применяется с древних времен и в настоящее время считается одним из самых эффективных немедикаментозных методов лечения и профилактики травм и заболеваний. В ряде случаев применение фармакологических препаратов может быть ограничено, а хирургическое вмешательство способно привести к осложнениям. В связи с этим наблюдается возросший интерес к развитию и практическому применению лечебного и профилактического массажа [1]. Одними из самых распространенных массируемых участков тела являются нижние и верхние конечности, включая коленные и локтевые суставы, а также шею пациента. При этом массажист использует следующие основные приемы: поглаживание и ра-

стирание, продольное и поперечное разминание верхних или нижних конечностей, мобилизацию и манипуляцию на локтевом или коленном суставе, манипуляцию вибрационного воздействия на конечность, манипуляцию принудительного движения свободной части конечности относительно смежной и др. Из-за необходимости силового воздействия на данные участки тела пациентов массажист в течение рабочего дня испытывает длительную физическую нагрузку, что приводит к его утомляемости и снижению производительности. Так, например, нагрузка массажиста при 6,5-часовом рабочем дне и 6-дневной рабочей неделе составляет 30 условных единиц (у. е.) в день. При этом на массаж верхней конечности отводится 1,5 у. е.;