

## Оценка эргономичности биотехнических систем с помощью нечетких моделей Шортлифа

### Аннотация

Одним из ведущих показателей, характеризующих надежность работы биотехнических систем, является эргономика их технической составляющей.

В статье предлагается оценивать уровень эргономичности с помощью модифицированных моделей Е. Шортлифа и показывается, как этот уровень влияет на состояние здоровья человека-оператора.

Известно, что надежность работы биотехнических систем, в контуре которых активно функционирует человек-оператор, во многом определяется эргономической составляющей технической обеспечения [1], [2].

Существует множество подходов к оценке эргономичности проектируемых эксплуатирующихся технических средств по различным показателям [1].

С математической точки зрения, показатели эргономичности технической системы носят разнотипный характер и измеряются в различных несопоставимых шкалах, что требует их естественного нормирования. Существует достаточно большое количество операций нормирования, среди которых особое место занимает использование функций принадлежности, которые при решении различных классификационных задач могут применяться для синтеза соответствующих решающих правил [3]-[8].

Использование функций принадлежности оправдано и тем, что при введении классов уровня эргономичности, решении задач прогнозирования и ранней диагностики заболеваний, вызываемых низким уровнем эргономичности, границы выделяемых классов не имеют четких аналитических описаний [2].

### Методы

При синтезе нечетких решающих правил, базирующихся на функциях принадлежности к исследуемым классам состояний, удобно применять общий методический подход, описанный в работах [3], [4], [8].

В соответствии с этим подходом для решения конкретной задачи оценки уровня эргономичности введем класс состояний, определяемый экспертами как передовой уровень эргономичности  $\omega_p$ , и определим следующую последовательность действий, приводящую к получению искомой нечеткой математической модели.

1. На основании технических описаний и экспертного оценивания составляют перечень эргономических свойств исследуемых классов технических систем (ТС). Для простых (получаемых на одной шкале) эргономических свойств определяют целесообразность и возможность использования прямых измерений эргономических свойств исследуемой ТС (группа свойств  $x_i$ ); измерений на специально создаваемых тренажерах (группа свойств  $y_j$ ); оценок психофизических ощущений, получаемых методами психофизического шкалирования (группа свойств  $S_k$ ); специально подбираемых или синтезируемых опросников (группа свойств  $t_q$ ). По каждой из полученных шкал, используя данные разведочного анализа, включая признаки и дистальные гистограммы, эксперты, например по методу Делфи, под руководством инженера-когнитолога определяют функции принадлежности к понятию «передовой уровень эргономичности» для каждого из выбранных свойств. Рекомендации по построению функций принадлежности по данным разведочного анализа можно найти в работах [3]-[5]. При этом конкретные значения функций принадлежности можно рассматривать как величины текущего уровня эргономичности ( $VЭ$ ).

В силу этого свойства назовем данные функции частными функциями уровня эргономичности  $f(x_i)$ ,  $f(y_j)$ ,  $f(s_k)$ ,  $f(t_q)$  [2].

Для исследования эргономических свойств, которые оцениваются через реакцию человека, взаимодействующего с тех-

нической системой, используют шкалы уровней психоэмоционального напряжения (ПЭН) –  $YN$  и хронического физического утомления (ХФУ) –  $YU$ , определяемые по методикам, разработанным на кафедре биомедицинской инженерии Юго-Западного государственного университета (ЮЗГУ). Передовой уровень эргономичности ТС по этим шкалам определяется функциями уровня эргономичности  $f(YN)$  и  $f(YU)$  [6].

2. Уровень эргономичности ТС в целом определяется агрегацией всех частных функций принадлежности в соответствии с выражением

$$YE = \min_r \{f(z_r)\}, \quad (1)$$

где  $YE$  – уровень эргономичности, определяемый по  $r$  частным свойствам;  $r = 1, \dots, P$ ;  $f(z_r)$  – функция уровня эргономичности по свойству

$$z_r = x_1, x_2, \dots, y_1, y_2, \dots, s_1, s_2, \dots, t_1, t_2, \dots, YN, YU.$$

3. Методом экспертного оценивания определяются функции принадлежности к классам эргономичности с базовой переменной  $YE$ , например, к следующим классам: неудовлетворительная  $\mu_n(YE)$ , удовлетворительная  $\mu_y(YE)$ , хорошая  $\mu_x(YE)$  и отличная  $\mu_o(YE)$  эргономика.

4. Используя предложенный метод оценки уровня эргономичности технических систем, решают задачи оценки их влияния на состояние здоровья человека-оператора (если каждое из свойств рассматривать с точки зрения их влияния на возникновение и развитие соответствующих профессиональных заболеваний).

Для реализации четвертого пункта, с учетом общих рекомендаций по синтезу нечетких решающих правил, изложенных в работах [3]-[5], предполагается следующий метод получения прогностических и диагностических моделей принятия решений.

Задачи прогнозирования будем рассматривать как задачи выделения двух классов состояний: не заболел с достаточно большой уверенностью через заданное время  $T_0$  (класс  $\omega_0$ ); заболел с достаточной уверенностью через время  $T_0$  (высокий риск заболевания – класс  $\omega_l$ , где  $l$  – название прогнозируемого заболевания).

Задачи ранней (донозологической) и дифференциальной диагностики рассматриваются как задачи отделения класса  $\omega_l$  от всех остальных классов  $\omega_0$  [3].

Анализ факторов риска, приводящих к появлению и развитию профессиональных заболеваний, возникающих от взаимодействия человека с ТС и окружающей средой, показал, что все существенные факторы можно разделить на три основные группы: факторы риска, порождаемые условиями труда, в первую очередь уровнем эргономичности транспортного средства; факторы, определяемые экологией среды проживания и работы; индивидуальные факторы риска, связанные с особенностями организма конкретного человека и его образом жизни.

Для построения соответствующих прогностических и диагностических решающих правил по каждой из указанных подгрупп введем частные коэффициенты уверенности в принимаемых решениях по выбранным классам заболеваний  $\omega_l$ :  $U_{T_n}^p$  – уверенность в гипотезе  $w_l$  от группы факторов риска, характеризующих условия труда;  $U_{S_n}^s$  – от экологически неблагопри-

ятных факторов;  $U_{И_{\omega_i}}^p$  – от индивидуальных факторов риска;  $p = ПВ$  – прогноз возникновения заболевания;  $p = ПО$  – прогноз обострения заболевания;  $p = РД$  – ранний (донозологический) диагноз.

По мнению высококвалифицированных экспертов, подтвержденному разведочным анализом и статистическим экспериментом, каждая из этих составляющих увеличивает уверенность в гипотезе  $\omega_i$ , поэтому в соответствии с рекомендациями Е. Шортлиффа агрегирование частных решений в финальное решающее правило целесообразно осуществлять в соответствии с выражением [3], [7], [8]

$$FU_{\omega_i}^p = U_{T_{\omega_i}}^p + U_{\Xi_{\omega_i}}^p + U_{И_{\omega_i}}^p - U_{T_{\omega_i}}^p \cdot U_{\Xi_{\omega_i}}^p - U_{T_{\omega_i}}^p \cdot U_{И_{\omega_i}}^p - U_{\Xi_{\omega_i}}^p \cdot U_{И_{\omega_i}}^p + U_{T_{\omega_i}}^p \cdot U_{\Xi_{\omega_i}}^p \cdot U_{И_{\omega_i}}^p. \quad (2)$$

Анализ условий труда операторов различных типов технических систем позволил установить, что они характеризуются эргономическими качествами технической системы; условиями взаимодействия с ТС и окружающей средой, которые с медицинской точки зрения порождают длительные психоэмоциональные перенапряжения и хроническое физическое утомление, провоцирующее целый ряд заболеваний; возможностью контакта во время работы с вредными экологическими факторами.

Для эргономической составляющей функции уровня эргономичности используются как базовые переменные для функций принадлежности к заболеваниям  $\omega_i$  для задач  $p - \mu_{\omega_i}^p [z_r]$  и агрегируются в частные решающие правила, отражающие «вклад эргономики» технических систем в появление и развитие заболеваний  $\omega_i$  в соответствии с выражением

$$U_{T_{\omega_i}}^p = U_{эп,\omega_i}^p + \mu_{\omega_i}^p (YN) + \mu_{\omega_i}^p (YU) - U_{эп,\omega_i}^p \cdot \mu_{\omega_i}^p (YN) - U_{эп,\omega_i}^p \cdot \mu_{\omega_i}^p (YU) - \mu_{\omega_i}^p (YN) \cdot \mu_{\omega_i}^p (YU) + U_{эп,\omega_i}^p \cdot \mu_{\omega_i}^p (YN) \cdot \mu_{\omega_i}^p (YU), \quad (3)$$

где  $\mu_{\omega_i}^p (YN)$  и  $\mu_{\omega_i}^p (YU)$  – функции принадлежности к классам  $\omega_i$  для задач типа  $p$  с базовыми переменными  $YN$  и  $YU$ , определяемые в соответствии с рекомендациями работы [5];  $U_{эп,\omega_i}^p$  – уровень уверенности в заболевании  $\omega_i$  для задач типа  $p$  по группе факторов риска, определяемых эргономикой технических средств.

В общем виде составляющая  $U_{эп,\omega_i}^p$  определяется выражением

$$U_{эп,\omega_i}^p (r+1) = U_{эп,\omega_i}^p (r) + \mu_{\omega_i}^p [z_r] [1 - U_{эп,\omega_i}^p (r)]. \quad (4)$$

Учет всех существенных эргономических свойств, влияющих на состояние здоровья, достаточно сложен. Поэтому на практике целесообразно для каждой  $ТС_{\gamma}$  типа  $\gamma$  воспользоваться статистическими сведениями об уровне заболеваемости. На основании такой статистики эксперты могут составить таблицы соответствий между типом ТС и уверенностью в заболеваниях  $\omega_i$  на этапах прогнозирования возникновения, обострения и ранней диагностики. Элементы таблицы определяют составляющие  $U_{эп,\omega_i}^p$  для правила (4) с заменой  $\mu_{\omega_i}^p [z_r]$  на  $U_{эп,\omega_i}^p$ .

Группа экологических факторов риска во многом определяется географией рабочего места и места проживания, а также культурой производства и такими факторами риска  $x_i$ , как наличие вредных веществ во вдыхаемом воздухе (включая пыль) и в питьевой воде; геопатогенные зоны в районе ТС; постоянные и переменные магнитные поля; пятна радиационного заражения и др. Уверенность в риске возникновения заболеваний  $\omega_i$  по задаче  $p$  от фактора  $x_i$  будем определять через соответствующие функции принадлежности с базовыми переменными, характеризующими величины вредных факторов –  $\mu_{\omega_i}^p (x_i)$ , которые агрегируются аналогично правилу 4.

Индивидуальные факторы риска определяются в основном образом жизни, индивидуальными особенностями организма, вредными привычками и т. д.

Рассматривая индивидуальные факторы риска  $x_i$  как базовые переменные соответствующих функций принадлежности

к классам  $\omega_i$  по задачам  $p - \mu_{\omega_i}^p (x_i)$  и решая задачу их агрегации аналогично (4), получаем третью составляющую для агрегирующего решающего правила (2). В работе [8] приводится конкретный пример получения решающих правил по индивидуальным факторам риска.

## Результаты практической реализации

В качестве конкретных задач исследовались профессиональные заболевания водителей транспортных средств, занятых в агропромышленном комплексе Курской области, среди которых наибольшее распространение получили виброболезнь (класс  $\omega_{ВБ}$ ) и кохлеарный неврит (класс  $\omega_{КН}$ ).

С учетом этиологии и патогенеза вибрационной болезни, по этому классу заболеваний эксперты отобрали 31 информативный признак и получили выражения типа (2) для оценки уверенности в прогнозе возникновения вибрационной болезни  $U_{\omega_{ВБ}}^{ПВ}$ , которая превышает величину 0,86, что является хорошим показателем качества принятия решений по выбранному классу задач.

По согласованию с экспертной группой раннему диагнозу виброболезни будет соответствовать такая ситуация, когда внешние ее проявления и болевые ощущения практически отсутствуют, но по таким характеристикам, как реографический индекс и энергетическая реакция биологически активных точек, характеризующих состояние периферических сосудов и нервных окончаний, можно судить о появлении небольших, но объективных отклонений от относительной нормы.

Уверенность в донозологическом (раннем) диагнозе виброболезни определяется выражением

$$U_{ВБ}^{РД} = U_{\omega_{ВБ}}^{РД} (Б) + U_{\omega_{ВБ}}^{РД} (РИ) [1 - U_{\omega_{ВБ}}^{РД} (РИ)],$$

где  $U_{\omega_{ВБ}}^{РД} (Б)$  – уверенность в донозологической форме, определяемая по системе биологически активных точек, которые меняют свое энергетическое состояние при длительном воздействии вибрации на организм в целом, а также на руки и ноги через органы управления и пол кабины;  $U_{\omega_{ВБ}}^{РД} (РИ)$  – уверенность, определяемая по реографическому индексу.

Результаты математического моделирования и экспертного оценивания показывают, что при максимальных значениях функций принадлежности  $FU_{ВБ}^{РД} \rightarrow 0,95$ , а при наиболее распространенных значениях  $FU_{ВБ}^{РД} \rightarrow 0,92$ , что вполне приемлемо для практических приложений.

Аналогично решались задачи прогнозирования и диагностики ранней стадии кохлеарного неврита (классы  $\omega_{КН}^{ПВ}$  и  $\omega_{КН}^{РД}$ ).

## Заключение

1. Метод синтеза нечетких моделей для описания и оценки уровня эргономичности технических систем, основанный на агрегации таких разнородных показателей, как результаты прямого измерения эргономических параметров, физического моделирования, психофизического шкалирования и тестового опроса, позволяет оценивать уровень эргономичности как отдельных элементов и узлов, так и технических систем в целом и учитывать их влияние на состояние здоровья операторов биотехнических систем.

2. Синтезированная система правил нечеткого вывода позволяет решать задачи прогнозирования появления виброболезни и кохлеарного неврита с уверенностью выше 0,88, ранней диагностики этих заболеваний – с уверенностью не хуже 0,87, что позволяет рекомендовать использование полученных результатов в медицинской практике.

*Работа выполнена при поддержке федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009-2013 гг.*

### Список литературы:

1. Падерно П.И., Попечителей Е.П. Надежность и эргономика биотехнических систем. – СПб.: ООО «Техномедиа», Изд-во «Элмор», 2007. 315 с.

2. Чурсин Г.В., Корневский Н.А., Бурмака А.А. Прогнозирование, ранняя и дифференциальная диагностика профессиональных заболеваний водителей транспортных средств с использованием нечетких моделей // Биомедицинская радиоэлектроника. 2010. № 2. С. 54-63.
3. Корневский Н.А. Синтез нечетких сетевых моделей, обучаемых по структуре данных, для медицинских энергетических систем // Медицинская техника. 2008. № 2. С. 18-24.
4. Корневский Н.А., Рябкова Е.Б. Метод синтеза нечетких решающих правил для оценки состояния сложных систем по информации о геометрической структуре многомерных данных // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2011. Т. 7. № 8. С. 128-136.
5. Корневский Н.А., Филлист С.А., Устинов А.Г., Рябкова Е.Б. Геометрический подход к синтезу нечетких решающих правил для решения задач прогнозирования и медицинской диагностики // Биомедицинская радиоэлектроника. 2012. № 4. С. 20-25.
6. Титов В.С., Сапотонова Т.Н. Классификация функциональных состояний человека и нечеткая оценка их уровня // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия «Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение». 2012. № 2. Ч. 3. С. 320-324.
7. Buchanan B.G., Shortliffe E.H. Rule-Based Expert Systems. – The MYCIN Experiments of the Stanford Heuristic Programming Project. Addison-Wesley Publishing Company. Reading, Massachusetts, 1984.
8. Al-Kasasbeh R., Korenevskiy N., Alshamasin M., Ionescou F., Smith A. Prediction of gastric ulcers based on the change in electrical resistance of acupuncture points using fuzzy logic decision-making // Computer Methods in Biomechanics and Biomedical Engineering. iFirst article. 2012. PP. 1-12.

Николай Алексеевич Корневский,  
д-р техн. наук, профессор,  
зав. кафедрой биомедицинской инженерии,  
Владимир Николаевич Гадалов,  
д-р техн. наук, профессор,  
кафедра оборудования и технологии  
сварочного производства,  
ФГБОУ ВПО «Юго-Западный  
государственный университет»,  
г. Курск,  
Евгений Николаевич Коровин,  
д-р техн. наук, профессор,  
кафедра системного анализа и управления  
в медицинских системах,  
ФГБОУ ВПО «Воронежский государственный  
технический университет»,  
г. Воронеж,  
Владимир Исаевич Серебровский,  
д-р техн. наук, проректор по учебной работе,  
ФГБОУ ВПО «Курская государственная  
сельскохозяйственная академия им. проф. И.И. Иванова»,  
г. Курск,  
e-mail: kstu-bmi@yandex.ru

*В.Н. Гадалов, В.А. Иванов, В.Н. Снопков, В.И. Серебровский*

## **Прогнозирование и ранняя диагностика заболеваний на основе оценки функционального резерва организма человека с помощью гетерогенных нечетких моделей**

### **Аннотация**

Рассматриваются вопросы определения уровня функционального резерва человека по комплексу таких разнородных показателей, как энергетический разбаланс меридианных структур, психоэмоциональное напряжение, умственное и физическое утомление, параметры пульса и артериального давления при воздействии дозированных умственных и физических нагрузок на основе использования гетерогенных нечетких моделей.

Одной из важнейших характеристик организма человека, отражающих его способность адекватно взаимодействовать с окружающей средой и непосредственно влияющих на состояние здоровья человека, является его функциональный резерв.

От того, насколько корректно и точно оценивается функциональный резерв организма и (или) его отдельных систем, зависит успешное решение целого ряда практически важных задач человеческой деятельности: от качественного управления информационно-насыщенными системами до эффективной организации медицинской помощи населению [1], [2].

Известен целый ряд методических подходов к определению функциональных резервов организма в целом, его функциональных систем и отдельных органов. Однако, несмотря на достигнутые успехи, проблема адекватной оценки функционального резерва и его связи с практическими задачами психологии и медицины остается далекой от своего окончательного решения.

### **Методы**

С физиологической точки зрения понятия «величина» и «уровень функционального резерва» экспертами точно не определяются. Различные эксперты сравнивают эти понятия со

сбалансированностью организма с внешней средой, готовностью к успешному выполнению трудовой деятельности, к противостоянию внешним неблагоприятным факторам и т. д.

Учитывая нечеткую природу понятия «функциональный резерв» и нечеткую природу возможной классификации этого понятия в качестве основного математического аппарата, была выбрана теория нечеткой логики принятия решений. Из этой теории нами были выбраны два подхода: подход, основанный на использовании функций принадлежности, который описан в работе Л. Заде [3], и подход, использующий коэффициенты уверенности, предложенный Е. Шортлифом [4], а также их модификации [5]-[8].

В качестве исходных признаков, определяющих классификацию и уровень функционального резерва (ФР) организма и его подсистем, на экспертном уровне были выбраны: энергетические характеристики меридианных структур, изменяющиеся при изменении уровня ФР; уровень психоэмоционального напряжения (ПЭН); уровень физического утомления (УФУ); уровень умственного утомления (УУУ); частота пульса (ЧП); величина систолического (САД) и диастолического (ДАД) артериального давления.

Согласно рекомендациям [1], [2], выбранные (или другие