

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

обоснованно вводимые) признаки  $x_i$ , определяемые непосредственно в ходе измерений или рассчитываемые с помощью соответствующих методик, определяются до и после дозированных физических и (или) умственных нагрузок. После этого определяется отношение измеряемого (или рассчитываемого) показателя до нагрузки ( $x_{i0}$ ) к значению этого же показателя, измеренного после нагрузочной пробы ( $x_{iH}$ ):

$$Y_i = \frac{x_{i0}}{x_{iH}}. \quad (1)$$

Вновь полученные показатели  $Y_i$  можно использовать как базовые переменные функций принадлежности к различным показателям (классам), характеризующим функциональный резерв организма и (или) его подсистем. Например, можно выделить такие классы, характеризующие ФР организма:

$\omega_0$  – оптимальный функциональный резерв здорового человека, позволяющий нормально и надежно функционировать при разумно повышенных нагрузках;

$\omega_1$  – удовлетворительный функциональный резерв, позволяющий нормально функционировать в обычных условиях без значительных перегрузок;

$\omega_2$  – неудовлетворительный функциональный резерв, при котором высоки риски появления и развития заболеваний и (или) непредвиденных сбоев в работе из-за недостатка резервных возможностей организма.

В качестве примера на рис. 1 показаны графики функций принадлежности к выбранным классам ФР с базовой переменной  $Y_j$ .

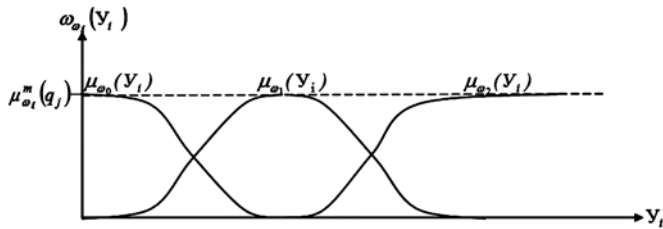


Рис. 1. Варианты распределения функций принадлежности по классам  $\omega_l$  ( $l = 0, 1, 2$ ) с базовой переменной  $Y_i$

Величина  $\mu_{\omega}^m \leq 1,0$ , ограничивающая максимальные значения функций принадлежности, отражает мнение экспертов о том, насколько можно доверять показателю  $Y_i$  при классификации ФР. Если эксперты считают, что выбранный показатель надежно характеризует такое понятие, как функциональный резерв организма, то  $\mu_{\omega}^m \leq 1,0$ .

В практических приложениях для оценки функционального резерва и его классификации часто используют несколько показателей, определяемых из соотношения (1). При этом доля уверенности в приведенной классификации при использовании одного показателя может быть невелика.

В таком варианте может ставиться и решаться задача поиска таких частных (по каждому из используемых показателей  $Y_i$ ) функций принадлежности и способов их агрегации, которые позволяют получить приемлемое для практики качество классификации.

Если обеспечить выбор показателей и соответствующих функций принадлежности таким образом, что использование каждой из них не уменьшает уверенность в принимаемом решении о классификации ФР, то в соответствии с рекомендациями [5], [8] общая уверенность в исследуемых гипотезах  $\omega$  может определяться с помощью «накопительной» итерационной формулы Е. Шортлифа

$$KY_{\omega_l}(i+1) = KY_{\omega_l}(i) + \mu_{\omega_l}(Y_{i+1}^*) [1 - KY_{\omega_l}(i)], \quad (2)$$

где  $KY_{\omega_l}(i)$  – коэффициент уверенности в классификации  $\omega_l$  ( $l = 0, 1, 2$ ), после того как проанализировано  $i$  показателей  $Y_i$ ;  $\mu_{\omega_l}(Y_{i+1}^*)$  – величина функции принадлежности, вычисленная для базовой переменной с номером  $i + 1$  в точке  $Y^*$ ;  $KY_{\omega_l}(0) = \mu_{\omega_l}(Y_1^*)$ .

Среди выделяемых классов состояний и соответствующих им функций принадлежности особый интерес представляет собой класс оптимального функционального резерва с функцией принадлежности  $\mu_{\omega_0}(Y_i)$ . Для этой функции принадлежности справедливо заключение о том, что чем «дальше» организм человека находится от понятия «оптимальный функциональный резерв», тем меньше  $\mu_{\omega_0}(Y_i)$  и тем меньше уровень этого резерва. Таким образом, величина  $\mu_{\omega_0}(Y_i)$  может характеризовать уровень функционального резерва организма. Причем в общем виде функция принадлежности  $\mu_{\omega_0}(Y_i)$ , построенная для решения классификационных задач, может совпадать с функцией принадлежности  $\mu_{\omega_0}(Y_i)$ , строящейся экспертами для определения уровня ФР, но может и не совпадать с ней. Если при этом для оценки уровня ФР используется несколько показателей, каждый из которых позволяет внести свой «положительный» вклад в оценку уровня функционирования исследуемых подсистем или организма в целом, то аналогично (1), можно интегральные уровни ФР оценивать с помощью выражений вида

$$UF(i+1) = UF(i) + \mu_{\omega_0}(Y_{i+1}^*) [1 - UF(i)]; \quad (3)$$

$$UF(i+1) = UF(i) + \mu_U(Y_{i+1}^*) [1 - UF(i)], \quad (4)$$

где  $UF(i)$  – уровень функционального резерва, определенный после привлечения к расчетам  $i$  показателей;  $\mu_{\omega_0}(Y_{i+1}^*)$  – величина функции принадлежности к классу  $\omega_0$  по показателю с номером  $i + 1$ , определенная в точке  $Y^*$  при условии, что для оценки уровня ФР используется классификационная функция принадлежности к классу  $\omega_0$ ;  $\mu_U(Y_{i+1}^*)$  – функция принадлежности к классу  $\omega_0$ , специально определяемая экспериментами для оценки уровня ФР.

## Результат исследований

В ходе проводимых исследований по проверке эффективности использования показателя уровня ФР в медицинских целях решалась задача оценки качества прогнозирования заболеваний гастритом без учета и с учетом признака UF.

В качестве основных факторов риска по гастриту желудка (без учета уровня ФР) эксперты выбрали следующие признаки:  $x_1$  – частота приема лекарственных средств, раздражающих слизистую оболочку желудка (в днях);  $x_2$  – частота приема алкоголя (не менее 65 мл в пересчете на литр в календарном месяце при однократном приеме в сутки);  $x_3$  – суточная доза никотина и его аналогов при табакокурении;  $x_4$  – наследственность заболеваемости желудка у близких родственников;  $x_5$  – энергетический разбаланс биологически активных точек, «связанных» с гастритом желудка (E21, E36, V21, V43 и VB24) [9], [10];  $x_6$  – уровень адаптационного потенциала организма.

По этой системе признаков в соответствии с рекомендациями по синтезу нечетких решающих правил, приведенных в работах [5]–[8], [11], были получены соответствующие функции принадлежности, которые были агрегированы в прогностическое решающее правило, аналогичное формуле (2), для расчета коэффициентов уверенности  $KY_{r,K}^{II}$  (прогноз заболевания гастритом в течение трех лет). Дополнительно по шкале UF был построен график функции принадлежности  $\mu_r^{II}(UF)$  к классу  $\omega_r^{II}$  – прогноз заболевания гастритом высокий (рис. 2).

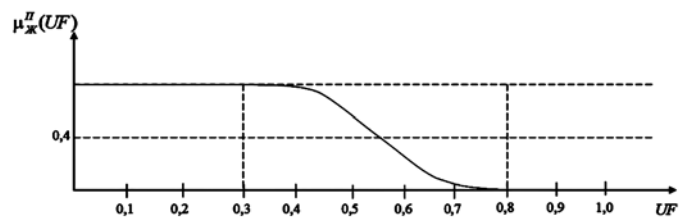


Рис. 2. График функции принадлежности к классу  $\omega_r^{II}$  с базовой переменной UF

Прогноз по двум составляющим определялся по формуле

$$KY_{r,K}^{II} = KY_r^{II} + \mu_r^{II}(UF) [1 - KY_r^{II}]. \quad (5)$$

На экспертном уровне доверие экспертов к показателю  $KU_{ГК}^{II}$  было определено на уровне 0,82, а к показателю  $KU_{ГК}^{II}$  – на уровне 0,89.

Для объективизации исследований были сформированы репрезентативные контрольные выборки объемом 100 человек на каждый из исследуемых классов. В ходе контрольных проверок определялись такие показатели качества (ПК) классификации, как диагностическая чувствительность (ДЧ), диагностическая специфичность (ДС), прогностическая значимость положительных (ПЗ<sup>+</sup>) и отрицательных (ПЗ<sup>-</sup>) результатов и диагностическая эффективность (ДЭ).

Результаты контрольных испытаний по правилу 1 (без учета уровня ФР) и по правилу 2 (с учетом уровня ФР) приведены в табл. 1.

Таблица 1

**Результаты испытаний правил прогнозирования возникновения заболеваний ЖКТ**

Правила \ ПК	ДЧ	ДС	ПЗ <sup>+</sup>	ПЗ <sup>-</sup>	ДЭ	КУ
Правило 1	0,85	0,86	0,87	0,83	0,85	0,82
Правило 2	0,92	0,93	0,93	0,91	0,92	0,89

КУ – коэффициенты уверенностей, достигаемые решающими правилами по мнению экспертов; ПК – показатель качества.

Анализ этой таблицы показывает, что добавление такого информативного показателя, как уровень функционального резерва, увеличивает качество прогнозирования на 6...8 %.

**Заключение**

Использование разнородных показателей, характеризующих различные уровни функционирования организма, позволяет учесть системный характер такого свойства организма человека, как его функциональный резерв. Использование аппарата нечеткой логики принятия решений позволяет корректно учитывать неопределенность рассматриваемого параметра в сочетании с нечетким пониманием его свойств специалистами, использующими это свойство в своей практической работе. Кроме того, нечеткая оценка уровня ФР позволяет легко встраивать данный показатель в системы нечеткого вывода, решающие широкий круг задач в области медицинской и психологической диагностики, профессионального отбора, профессиональной ориентации и т. д.

*Список литературы:*

1. Корневский Н.А., Коростелев А.Н. Применение гетерогенных нечетких моделей для комплексной оценки уровня функционального резерва человека // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2011. Т. 7. № 8. С. 142-147.
2. Яцун С.Ф., Бойцов А.В. Нечеткая оценка уровня функционального резерва человека // Известия Юго-Западного государственного университета. 2012. № 2. Часть 3. С. 271-276.
3. Zadeh L.A. Advances in Fuzzy Mathematics and Engineering: Fuzzy Sets and Fuzzy Information-Granulation Theory. – Beijing: Beijing Normal University Press, 2005.
4. Shortliffe E.H. Computer-Based Medical Consultations: MYCIN. – New York: American Elsevier, 1976.
5. Корневский Н.А. Синтез нечетких сетевых моделей, обучаемых по структуре данных, для медицинских систем // Медицинская техника. 2008. № 2. С. 18-24.

6. 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.
7. Корневский Н.А., Филист 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.
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.
9. Иванов В.А., Яковлев А.П., Яковлева Е.А. Математический анализ насыщенности нервами и корреляционная взаимосвязь анатомических (акупунктурных) зон ушной раковины человека // Системный анализ и управление в биомедицинских системах. 2012. Т. 11. № 1. С. 228-236.
10. Гадалов В.Н., Корневский Н.А., Снопков В.Н. Математические модели, рефлекторные системы организма человека и их использование для прогнозирования и диагностики заболеваний // Системный анализ и управление в биомедицинских системах. 2012. Т. 11. № 2. С. 515-521.
11. Крупчатников Р.А., Ключиков И.А., Шульга Л.В., Харьков С.В. Расчет уверенностей в принимаемых решениях по энергетической реакции меридианных структур // Известия Юго-Западного государственного университета. 2011. № 6 (390). Ч. 2. С. 62-67.

Владимир Николаевич Гадалов,  
д-р техн. наук, профессор,  
кафедра материаловедения  
и сварочного производства,  
ФГБОУ ВПО «Юго-Западный  
государственный университет»,  
Виктор Афанасьевич Иванов,  
д-р мед. наук, зав. кафедрой медицины и логопедии,  
ФБГОУ ВПО «Курский  
государственный университет»,  
Владимир Николаевич Снопков,  
д-р мед. наук, профессор,  
кафедра биомедицинской инженерии,  
ФГБОУ ВПО «Юго-Западный  
государственный университет»,  
Владимир Исаевич Серебровский,  
д-р техн. наук, профессор,  
кафедра электротехники  
и механизации животноводства,  
ФГБОУ ВПО «Курская государственная  
сельскохозяйственная академия  
им. проф. И.И. Иванова»,  
г. Курск,  
e-mail: kstu-bmi@yandex.ru