

3. Шехине М.Т., Лазурина Л.П., Корневский Н.А., Артеменко М.В. Синтез комбинированных нечетких решающих правил для прогнозирования и диагностики острого холецистита // Биомедицинская радиоэлектроника. 2010. № 2. С. 70-75.
4. Корневский Н.А. Синтез нечетких сетевых моделей, обучаемых по структуре данных, для медицинских систем // Медицинская техника. 2008. № 2. С. 18-24.
5. 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.
6. 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.
7. Al-Kasasbeh R., Korenevskiy N., Alshamasin M., Ionescou M., 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.
8. 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.
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.

Виталий Семенович Титов,
 д-р техн. наук, профессор,
 зав. кафедрой вычислительной техники,
 Владимир Николаевич Гадалов,
 д-р техн. наук, профессор,
 кафедра материаловедения
 и сварочного производства,
 ФГБОУ ВПО «Юго-Западный
 государственный университет»,
 Людмила Петровна Лазурина,
 д-р биолог. наук, профессор,
 зав. кафедрой биологической
 и химической технологии,
 ГБОУ ВПО «Курский государственный
 медицинский университет»
 Минздрава России,
 Станислав Петрович Серегин,
 д-р мед. наук, профессор,
 кафедра биомедицинской инженерии,
 ФГБОУ ВПО «Юго-Западный
 государственный университет»,
 г. Курск,
 e-mail: kstu-bmi@yandex.ru

В.С. Титов, В.Н. Мишустин, А.В. Новиков, Е.Н. Коровин

Классификация функциональных состояний и оценка уровня психоэмоционального напряжения и утомления на основе гибридных нечетких моделей

Аннотация

Рассматриваются вопросы классификации функциональных состояний как индикаторов риска возникновения и развития заболеваний человека и оценки уровня таких классов, как психоэмоциональное напряжение и утомление, на основе использования гибридных нечетких моделей.

Существует большой арсенал методов и средств определения функциональных состояний человека по различным системам психологических, психофизиологических и физиологических признаков. Однако проблема диагностики этих состояний далека от своего разрешения. Единство мнений отсутствует даже при определении самого понятия функционального состояния.

На основании анализа существующих подходов к диагностике функциональных состояний (ФС) человека за классификационные основы были взяты такие состояния, анализ которых позволяет решать задачи прогнозирования и ранней диагностики заболеваний, связанных с изменением ФС.

Как показали специально проводимые исследования, выбранный комплекс задач может быть решен, если обеспечить достаточно точное выделение таких классов ФС, как состояния покоя, активации, эмоционального напряжения и различных стадий утомления. В связи с этим основным объектом исследования были выбраны люди, находящиеся в названных классах состояний, полученных как в их обычной жизни, так и смоделированных искусственно. Дополнительно изучались ФС людей, болеющих некоторыми типами психосоматических заболеваний (нервные болезни, заболевания сердечно-сосудистой системы, заболевания желудочно-кишечного тракта). В ходе проведенных исследований было показано, что простое разделение классов ФС на номинальное состояние (состояние оперативного покоя – класс ω_0), состояние активации (класс ω_A), состояние психоэмоционального напряжения (класс ω_H),

состояние утомления (класс ω_U), с точки зрения задач оценки риска появления и развития заболеваний, является весьма грубым [1], [2].

Например, состояние кратковременного нервно-психического напряжения низкой и средней интенсивности повышает эффективность работы операторов в человеко-машинных системах и не создает риска появления профессиональных заболеваний. Наоборот, длительное психоэмоциональное напряжение средней и высокой интенсивности, особенно в сочетании с утомлением, приводит к снижению эффективности работы человеко-машинных систем и повышению риска появления и развития психосоматических заболеваний.

Аналогичные примеры легко привести и по сочетаниям других введенных классов состояний.

С учетом этого для каждого базового класса состояний были введены два дополнительных параметра – уровень и продолжительность.

Методы

В работах [1], [2] было показано, что решение задачи разделения ФС по классам ω_0 , ω_A , ω_H , ω_U целесообразно осуществлять в двумерном пространстве $\Phi = y_1 \times y_2$ с отображающими функциями вида

$$\begin{cases} Y_1 = x_H + x_K; \\ Y_2 = x_U, \end{cases} \quad (1)$$

где $x_{II} = ПВ - ПВ_0$; $x_K = KB - KB_0$; $x_Y = УВ - УВ_0$; $ПВ$ и $ПВ_0$ – текущая переключаемость внимания и переключаемость внимания, измеренная в состоянии спокойного бодрствования; KB и KB_0 – соответствующие показатели концентрированности внимания; $УВ$ и $УВ_0$ – соответствующие показатели устойчивости внимания, определяемые с помощью методик и аппаратуры, описанных в работе [3].

Для этого двумерного пространства получены разделяющие границы для исследуемых классов состояний, которые носят весьма условный характер с достаточно большой зоной неопределенности, где наблюдаются взаимные проникновения классов друг в друга как в отображающем, так и в исходном пространстве признаков.

В этих условиях, согласно рекомендациям [4]-[8], было принято решение о нечеткой классификации функциональных состояний относительно границ выделяемых классов с построением следующих функций принадлежности: $\mu^1_A(Y_1)$, $\mu^1_A(Y_2)$, $\mu^2_A(Y_1)$, $\mu^1_H(Y_1)$, $\mu^1_H(Y_2)$, $\mu^2_H(Y_1)$, $\mu^1_Y(Y_1)$, $\mu^1_Y(Y_2)$, $\mu^2_Y(Y_1)$, $\mu^2_Y(Y_2)$.

Верхний индекс в обозначении функции принадлежности определяет номер области исследуемых классов функциональных состояний [1].

Решение о классификации принимается по коэффициентам уверенности, определяемым по формулам [1], [2]:

$$KY_{\omega_H} = \min[\mu^1_H(Y_1), \mu^1_H(Y_2)]; \quad (2)$$

$$KY_{\omega_A} = \max\{\min[\mu^1_A(Y_1), \mu^1_A(Y_2)], \min[\mu^2_A(Y_1), \mu^2_A(Y_2)]\}; \quad (3)$$

$$KY_{\omega_Y} = \max\{\min[\mu^1_Y(Y_1), \mu^1_Y(Y_2)], \min[\mu^2_Y(Y_1), \mu^2_Y(Y_2)]\}. \quad (4)$$

Для оценки уровня психоэмоционального напряжения (ПЭН) и утомления, в соответствии с рекомендациями [1], [2], были использованы три группы информативных признаков: показатели внимания с отображающим пространством $\Phi = Y_1 \times Y_2$; электрические сопротивления биологически активных точек, «связанных» с ПЭН и утомлением; результаты субъективного тестирования по табличным компьютерным тестам. В первой группе признаков в качестве базовых переменных используются значения координат Y_1 и Y_2 [2].

В качестве информативных признаков, характеризующих энергетическое состояние меридианных структур по выбранному множеству БАТ, «связанных» с ПЭН, используются величины относительных отклонений энергетических характеристик этих точек от своих номинальных значений – δR_j , где j – номер БАТ в блоках информативных признаков [9]-[11].

По третьему блоку признаков уровень психоэмоционального напряжения (ПЭН – класс ω_H) определяется по шкалам ситуативной тревожности (СТ) и личной тревожности (ЛТ) теста Спилберга-Ханина, уровень утомления – с использованием индекса хронического утомления (ИХРУ), индекса умственного утомления (ИУУ) и индекса физического утомления (ИФУ), способ расчета которых описан в работе [1].

В соответствии с рекомендациями работ [1] и [2], по каждому из выбранных признаков строятся функции уровня ПЭН $YH^*(H_r)$ и утомления $YU(U_r)$, обладающие свойствами функций принадлежности к классам, определяемым как максимальные значения уровня ПЭН и утомления, при которых возникает высокий риск появления и развития исследуемых классов заболеваний или, при оценке надежности функционирования биотехнических систем, появляется риск в сбое их работы из-за человеческого фактора. Функции $YH^*(H_r)$ и $YU(U_r)$ выбираются таким образом, что каждая из них вносит свой вклад в оценку исследуемого показателя аналогично коэффициентам уверенности Е. Шортлифа [7].

Тогда по всем полученным составляющим уровни активации, психоэмоционального напряжения и утомления целесообразно определять соотношениями

$$YH(s+1) = YH(s) + YH^*(H_r)[1 - YA(s)]; \quad (5)$$

$$YU(s+1) = YU(s) + YU^*(U_r)[1 - YU(s)], \quad (6)$$

где

$$H_r = Y_1, Y_2, \delta R_j, CT, ЛТ;$$

$$U_r = Y_1, Y_2, \delta R_j^*, ИХРУ, ИУУ, ИФУ.$$

Для оценки продолжительности нахождения человека в различных классах функциональных состояний может быть использована непрерывная шкала времен, тогда влияние времени нахождения в ω_i на решение выбранных классов задач удобно характеризовать соответствующей функцией уверенности $f_{\omega_i}(t)$.

Если обозначить уровень показателя, характеризующего состояние класса ω_i , через U_{ω_i} , тогда каждый из выделяемых классов будет определяться парой

$$\Omega_i = \{U_{\omega_i}, f_{\omega_i}(t)\}, \quad (7)$$

где

$$U_{\omega_i} = YA, YH, YU.$$

Результаты

В ходе проводимых экспериментальных исследований изучалось качество принятия решений правилами прогнозирования и ранней диагностики заболеваний сердца без использования и при использовании показателей, характеризующих ФС человека. Исследовались пациенты с такими заболеваниями, как стенокардия, аритмия различных типов и ишемическая болезнь сердца. При решении задачи прогнозирования в качестве информативных признаков использовались следующие: частота курения, употребление алкоголя, в анамнезе отравление тяжелыми металлами (свинец, ртуть и др.) и ядами органического происхождения, избыточное питание, адаптационный резерв организма, электрический баланс БАТ, «связанных с сердцем», содержание холестерина в крови, содержание в крови монопротеидов высокой плотности, содержание монопротеидов низкой плотности, артериальное давление.

Для выбранной системы информативных признаков эксперты по методу Делфи получили функции уверенностей $f_{\omega_i}(x_i)$ в том, что у пациентов высокий риск появления заболеваний сердца ω_c . Данные функции в соответствии с рекомендациями [4]-[6] агрегировались в решающее правило 1 вида

$$KY_c^*(i+1) = KY_c^*(i) + f_{\omega_c}(x_i)[1 - KY_c^*(i)]. \quad (8)$$

Правило 2 (с учетом ПЭН и утомления) определялось выражением вида

$$KY_c = KY_c^* + \mu_c(YH) + \mu_c(YU) - KY_c^* \mu_c(YH) - KY_c^* \mu_c(YU) - \mu_c(YH) \cdot \mu_c(YU) + KY_c^* \cdot \mu_c(YH) \cdot \mu_c(YU), \quad (9)$$

где $\mu_c(YH)$, $\mu_c(YU)$ – функции принадлежности к классу ω_c с базовыми переменными YH и YU .

В ходе проведенных исследований для прогностической задачи были получены показатели качества для правила 1 (без показателей, характеризующих функциональное состояние человека) и для правила 2 (с использованием этих показателей, см табл. 1).

Таблица 1

Результаты контрольных испытаний прогностических решающих правил

Правила \ ПК	ДЧ	ДС	ПЗ ⁺	ПЗ ⁻	ДЭ
Правило 1	0,85	0,89	0,88	0,85	0,87
Правило 2	0,96	0,93	0,94	0,96	0,94

В этой таблице: ПК – показатели качества; ДЧ – диагностическая чувствительность; ДС – диагностическая специфичность; ПЗ⁺, ПЗ⁻ – прогностическая значимость положитель-

ных и отрицательных результатов; ДЭ – диагностическая эффективность.

Анализ данных *табл. 1* показывает, что применение показателей, характеризующих функциональное состояние человека, позволяет улучшать качество прогнозирования в среднем на $(12 \pm 3) \%$.

Аналогичные результаты были получены для задачи ранней диагностики заболеваний сердца.

По этой задаче при использовании информации о ФС человека наблюдается улучшение качества классификации на $(9 \pm 1) \%$.

Аналогично оценивалось качество принятия решений по прогнозированию и ранней диагностике нервных болезней, и было показано, что использование признаков, характеризующих ФС человека, по прогностическим и диагностическим решающим правилам увеличивает качество классификации по этим болезням на $(10 \pm 2) \%$.

Заключение

1. Одной из важных проблем современного здравоохранения является повышение качества медицинского обслуживания населения, включая решение задач прогнозирования, диагностики, выбора рациональных схем профилактики и лечения, повышения безопасности функционирования человеко-машинных систем и др. Опыт решения подобных задач показывает, что эффективность их решения заметно возрастает, если в качестве интегрального показателя, характеризующего функционирование организма, использовать оценку его функционального состояния с дальнейшим выбором рациональных схем управления этим состоянием.

2. Использование разнородных показателей, характеризующих различные сферы психики, позволяет учесть системный характер такого психофизиологического свойства, как функциональное состояние. Применение 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 функционального состояния позволяет легко встраивать этот показатель в системы нечеткого вывода, решающие широкий круг задач в области медицинской и психологической диагностики, профессионального отбора и профессиональной ориентации и т. д.

3. Практическая пригодность и целесообразность использования предлагаемого подхода к оценке состояния человека определяются тем, что полученный набор нечетких решающих правил позволяет решать задачи классификации функциональных состояний с уверенностью в принимаемых решениях не хуже 0,93, для прогнозирования заболеваний сердца и нервной системы с уверенностью не ниже 0,85 и ранней диагностики этих заболеваний с уверенностью на уровне 0,85 и выше в зависимости от количества и качества собираемой информации.

Список литературы:

1. Филатова О.И., Корневский Н.А. Метод синтеза комбинированных правил классификации и оценки уровня показателей, характеризующих функциональное состояние человека // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2011. Т. 7. № 7. С. 160-164.
2. Тутов В.С., Сапотонова Т.Н. Классификация функциональных состояний человека и нечеткая оценка их уровня // Известия Юго-Западного государственного университета. 2012. № 2. Часть 3. С. 320-324.
3. Korenevskiy N.A., Skopin D.E., Al Kasasbeh R.T., Kuz'min A.A. System for Studying Specific Features of Attention and Memory / Biomedical Engineering Journal. 2010. Vol. 44. № 1. PP. 32-35.
4. Корневский Н.А. Синтез нечетких сетевых моделей, обучаемых по структуре данных, для медицинских систем // Медицинская техника. 2008. № 2. С. 18-24.

5. 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.
6. 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.
7. Shortlife E.H. Testing reality: The introduction of decision – support technologies for physicians // Meth. Inf. Med. 1989. Vol. 28. № 1. PP. 1-5.
8. Zade L.A. Fuzzy – algorithmic approach to the Lefinition of complex or imprecise concepts // Int. J. Man – Machine Studies. 1976. № 8. PP. 249-291.
9. 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.
10. 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.
11. 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.

*Виталий Семенович Тутов,
д-р техн. наук, профессор,
зав. кафедрой вычислительной техники,
ФГБОУ ВПО «Юго-Западный
государственный университет»,
Владимир Николаевич Мишустин,
д-р мед. наук, профессор,
кафедра хирургических болезней,
ГБОУ ВПО «Курский государственный
медицинский университет»
Минздравсоцразвития РФ,
Алексей Викторович Новиков,
д-р мед. наук, профессор,
кафедра биомедицинской инженерии,
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,
e-mail: kstu-bmi@yandex.ru*