

Методы количественной оценки защитных механизмов организма на различных его уровнях на основе гибридных нечетких моделей

Аннотация

Рассматриваются методы синтеза нечетких решающих правил для количественной оценки защитных механизмов организма и их интеграции в гибридные модели прогнозирования и диагностики социально значимых заболеваний. На примере системы управления сердечным ритмом и когнитивной функции внимания показано, что уверенность в правильном принятии решений по выбранному классу заболеваний превышает величину 0,9, что позволяет рекомендовать полученные результаты к практическому использованию.

Введение

Современной медицинской науке известно множество механизмов защиты, обеспечиваемых двумя системами: неспецифической (сопротивляемость организма) и специфической (иммунная система), которые имеют сверхсложную и достаточно плохо изученную структуру нестационарного, динамического типа, что не позволяет получить надежные модели количественной оценки уровня защиты организма (УЗО) от различных типов факторов риска с последующим выбором оптимальных условий жизнедеятельности, включая адекватные возникающим событиям схемы профилактики и лечения.

На современном этапе развития науки удается получить лишь частные модели и рекомендации по оценке индивидуальной защиты организма от очень ограниченного и достаточно простого набора факторов риска.

Это делает актуальной проблему поиска таких индикаторов уровня защиты организма от воздействия внешних факторов риска, использование которых позволит решать задачи синтеза математических моделей прогнозирования и оценки состояния организма в условиях отсутствия формальных моделей при неполном и нечетком описании объекта исследования.

Анализ современных подходов к решению задач количественной оценки уровня защиты организма показывает, что в качестве соответствующей теоретической основы наиболее часто применяют современную адаптологию, в рамках которой для количественной оценки УЗО различные исследователи используют показатели адаптационного потенциала и адаптационного соответствия, функциональное состояние и резерв как всего организма, так и его органов и систем, перикисное окисление липидов и антиоксидантную активность, иммунологические лабораторные показатели, энергетические характеристики биологически активных точек и др. [1]-[6].

Перечисленные и другие аналогичные показатели чаще всего используют для оценки приграничных состояний, характеризующих переход от состояния здоровья в предболезнь и болезнь. К более «тонким» реакциям организма на начинающиеся негативные процессы они практически нечувствительны, что делает их малоинформативными для решения задач прогнозирования и недостаточно информативными для решения задач ранней диагностики для широкого круга социально значимых заболеваний.

Методы исследования

Одним из важных практических применений показателей, характеризующих уровень защиты организма и его систем, является их использование как информативных признаков при синтезе моделей прогнозирования и ранней диагностики заболеваний, провоцируемых действием внешних факторов риска, включая производственные факторы [5], [7], [8].

Анализ литературы и собственные исследования показали, что как задачи оценки уровня защиты организма на различных его уровнях, так и задачи прогнозирования появления и

развития заболеваний различной природы, включая раннюю диагностику, оценку степени тяжести и динамику развития заболеваний, относятся к классу плохо формализуемых задач с нечеткой и неполной структурой данных, что делает целесообразным использование технологии мягких вычислений [9]-[12], и в частности методологии синтеза гибридных нечетких решающих правил (МСГНРП), которая выбрана в качестве базового математического аппарата исследований [5], [7], [8], [13].

Для оценки уровня защиты организма разработан целый набор показателей, агрегация которых в единое решающее правило может привести к повышению точности оценки уровня защиты, а через него – к появлению и развитию заболеваний органов-мишеней с получением надежно работающих прогнозистических и диагностических моделей.

При этом показатели, характеризующие уровень защиты организма, являются измеряемыми (при помощи специальной аппаратуры) признаками, а рассчитываемый уровень УЗО организма в целом (целевая функция) относится к классу нечетких, не строго и разноречиво определяемых в современной медицине понятий. Такая взаимосвязь между набором признаков и целевой функцией характерна для теории измерения латентных переменных, для практического применения которой разработан интерактивный пакет RUMM2020 [5], [13], [14]. Анализ результатов обработки данных этим пакетом позволяет не только сформировать набор индикаторов для измерения латентной переменной (в данном контексте – «уровень защиты организма»), но и ранжировать индикаторы по их значимости.

Значительное число работ в области адаптологии посвящено исследованию УЗО всего организма (общесистемный уровень). Для его количественной оценки используют такие показатели, как индекс функциональных изменений (ИФИ); адаптационный потенциал (АП); показатель адаптационного соответствия (ПАС); УЗО по показателям иммунного статуса (UZ_A); энергетический разбаланс общесистемных биологически активных точек (БАТ) (ЭР); показатели антиоксидантной активности, определяемые через относительные отклонения перикисного окисления липидов (ПОЛ) и антиокислительной активности (АОА) от своих номинальных значений; показатели, характеризующие функциональное состояние (ФС) и функциональный резерв (ФР) организма на общесистемном уровне, и др. [1], [2], [5], [8], [15]-[18].

Применение пакета RUMM2020 для показателей, описывающих УЗО на общесистемном уровне, позволило определить список информативных признаков для синтеза соответствующего комбинированного решающего правила в составе АП, ЭР, ПАС, ПОЛ и АОА. Далее, в соответствии с общими рекомендациями МСГНРП для полученного набора индикаторных информативных признаков, эксперты, используя технологию Дельфы, определили соответствующие функции уровня защиты UZ_q .

В качестве примера на *рис. 1* представлен график функции уровня защиты по показателю ПАС.

В работе [1] приведены механизмы получения и функции уровня защиты по показателям ПАС, АП и ЭР, $UZ_{АП}$, $UZ_{ЭР}$ и $UZ_{ПАС}$ соответственно. В работе [2] получено выражение функции уровня защиты UZO для антиоксидантной активности путем агрегации показателей ПОЛ и АОО.

Финальное выражение для оценки УЗО на общесистемном уровне получают путем агрегации выбранных функций уровня защиты. При этом, по мнению экспертов, выбор функций агрегации должен определяться последующими целями использования показателя УЗО.

Если интегральный уровень УЗО определяется по совокупности выбранных функций уровня защиты, определяемых для различных типов уровней защиты, и считается, что каждая из выбранных систем защиты вносит свой вклад в общий интегральный показатель таким образом, что увеличение защитных функций каждой системы увеличивает общий уровень защиты организма, то УЗО на общесистемном уровне UZI определяется с использованием модифицированной формулы Е. Шортлифа вида

$$UZI(q+1) = UZI(q) + Q(q+1)[1 - UZI(q)], \quad (1)$$

где $UZI(1) = UZ_{АП} = Q(1)$; $Q(2) = UZ_{ЭР}$; $Q(3) = UZ_{ПАС}$; $Q(4) = UZO$.

При осторожной стратегии, когда следует считать, что потеря защитных функций одной системы ведет к потере защитных функций всего организма, следует использовать агрегатор вида

$$UZI = \min(UZ_{АП}, UZ_{ЭР}, UZ_{ПАС}, UZO). \quad (2)$$

В последнем выражении не используемый в расчетах показатель заменяется единицей.

Вопросы количественной оценки УЗО по отдельным органам и системам за исключением сердечно-сосудистой системы в известной литературе практически не рассматриваются. Для решения задач прогнозирования и ранней диагностики заболеваний, провоцируемых внешними факторами риска, предпочтение отдается оценкам функционального состояния и функционального резерва исследуемых органов и систем, которые, в свою очередь, прямо или косвенно характеризуют их уровень защиты [1], [3], [4].

Практический опыт решения задач прогнозирования и ранней диагностики заболеваний, вызываемых множеством разнородных экзогенных и эндогенных факторов риска, показал, что на органном и системном уровнях уровень защиты целесообразно определять по уровню защиты организма на общесистемном уровне, электрическим характеристикам БАТ, «связанных» с исследуемыми структурами организма, и по методам, общепринятым в медицинской практике.

В соответствии с рекомендациями [5], [8], [18] задачу оценки уровня ФС по электрическим характеристикам БАТ предлагается проводить в два этапа. На первом этапе эксперты в области биофизики акупунктуры определяют электрический разбаланс ER_s точек, выбранных из атласов меридианов под конкретную ситуацию в соответствии с выражением

$$\text{ЕСЛИ } [(\delta R^D_{Y1} > \delta R^I) \text{ И } (\delta R^D_{Y2} > \delta R^I), \dots, (\delta R^D_{Yms} > \delta R^I)], \quad (3)$$

$$\text{ТО } [ER_s = F_E(EY_{sj})], \text{ ИНАЧЕ } (ER_s = 0),$$

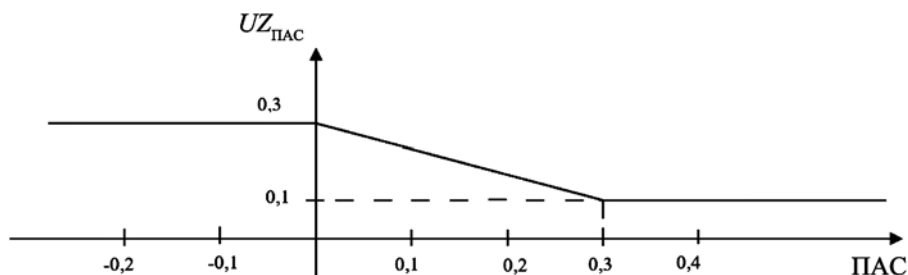


Рис. 1. График функции уровня защиты по показателю ПАС

где EY_{sj} – энергетический разбаланс БАТ с именем Y_{sj} , выбранных как информативные по отношению к ФС; δR^D_{Y1} – величина относительного отклонения сопротивления R_{Yj} из списка ДЗТ от своего номинального значения для БАТ с идентификатором Y_j ; δR^I – пороговое значение отклонений БАТ от номинального значения; F_E – агрегатор энергетического разбаланса, определяемый в соответствии с рекомендациями [5], [8].

Во втором этапе электрический разбаланс ER_s общесистемных БАТ выбирается в качестве базовой переменной для функции принадлежности $\mu_{\Phi H}(ER_s)$ к лингвистической переменной – нормальное функциональное состояние на физиологическом уровне. Получение $\mu_{\Phi H}(ER_s)$ производят эксперты-специалисты в области функциональных состояний [5].

В соответствии с рекомендациями [5], [8] функциональный резерв определяется двумя показателями: отношением ON_i уровня ФС до воздействия нагрузкой UFS^0_i и после воздействия UFS^N_i и скоростного восстановления уровня ФС $VV_i = (UFS^0_i - UFS^N_i) / T_{НБ}$ за время наблюдения $T_{НБ}$.

По показателям ON_i и VV_i определяются частные функции уровня функционального резерва $f_{FR}(ON_i)$ и $f_{FR}(VV_i)$, по которым рассчитывается ФР для системы (органа) с идентификатором i :

$$FR_i = f_{FR}(ON_i) + f_{FR}(VV_i) - f_{FR}(ON_i)f_{FR}(VV_i). \quad (4)$$

Для оценки ФС и ФР по традиционным для медицины методам относительно выбранных мишеней производится экспертный отбор информативных показателей с применением интерактивного пакета RUMM 2020. При этом следует иметь в виду, что для различных органов и систем разработано множество «своих» специфических методов и средств. Например, для оценки ФС и ФР центральной нервной системы используют простую и сложную зрительно-моторные реакции. Для оценки ФС периферической нервной системы используют ортостатическую пробу, вариабельность сердечного ритма (BCP) и др.

Отобранные как информативные показатели ФС и ФР используются для синтеза частных решающих правил оценки уровня защиты на системном и органном уровнях аналогично синтезу УЗО на общесистемном уровне.

После синтеза решающих правил оценки уровня защиты на общесистемном, системном и органном уровнях в соответствии с общими рекомендациями МСГНРП определяются функции принадлежности к лингвистическим переменным, определяющим частные уверенности в появлении и развитии патологии ω_j по задаче p (p – прогноз, ранняя стадия заболевания, степень тяжести патологии и др.).

Для повышения точности принимаемых решений для органов мишеней ω_j определяются сопутствующие факторы риска, связанные с экологией, эргономикой, индивидуальными особенностями организма. Для оценки индивидуального состояния организма рекомендуется использовать уровни психоэмоционального напряжения и утомления, данные опросов, осмотров, инструментальных и лабораторных исследований, принятых в традиционной медицинской практике.

В общем виде, используя общие рекомендации по синтезу гибридных нечетких решающих правил для решения задач прогнозирования, ранней и возможно дифференциальной ди-

агностики исследуемого класса заболеваний, синтезируются гибридные модели вида

$$F_i^p = AG_i^p(UZO_i^p, UFS_{BI}^p, UFR_{BI}^p, UFS_{DI}^p, UFR_{DI}^p, UFB_i^p, UER_i^p, UEK_i^p, UD_i^p), \quad (5)$$

где AG_i^p – агрегатор составляющих финального решающего правила; UZO_i^p – уверенность в ω_i по задаче p от УЗО на общесистемном уровне; UFS_{BI}^p, UFR_{BI}^p – уверенность в ω_i , определяемая по уровням ФС и ФР, рассчитываемым по энергетическому разбалансу БАТ; UFS_{DI}^p, UFR_{DI}^p – уверенность в ω_i от ФС и ФР, определяемая традиционными методами исследования; UFB_i^p – уверенность в ω_i , определяемая по электрическим характеристикам БАТ, связанных с патологией ω_i ; UER_i^p – уверенность в ω_i , связанная с уровнем эргономики рабочего места; UEK_i^p – уверенность в ω_i , зависящая от экологической нагрузки; UD_i^p – уверенность в ω_i по задаче p от индивидуального состояния здоровья.

Следует отметить, что в реальных задачах в моделях (5) могут быть использованы не все составляющие, что приводит не к отказу от принимаемых решений, а только к возможному снижению их качества.

Если при синтезе решающих правил использовать принятое в современной адаптологии понятие адапционного потенциала, являющегося также характеристикой уровня защиты организма, то при синтезе соответствующих решающих правил можно повысить их уровень специфичности в части разделения пациентов с высоким риском патологии систем и органов мишеней от пациентов с наличием ранних стадий исследуемых заболеваний. Это связано с тем, что по показателям адапционного потенциала определяются такие классы состояний, как неудовлетворительная адаптация (НА) и срыв механизмов адаптации (СМА). По наличию этих классов состояний строится решающее правило перехода от прогностических к диагностическим решающим правилам с использованием моделей вида

$$\text{ЕСЛИ (НА) ТО (От ПП перейти к ПРД);} \quad (6)$$

$$\text{ЕСЛИ (СМА) ТО (От ПП или ПРД перейти к ДРП),} \quad (7)$$

где ПП – прогностические решающие правила; ПРД – правила ранней диагностики; ДРП – диагностические решающие правила.

В общем виде в этих моделях могут быть использованы и «переключатели» по уровню защиты организма, его систем и органов.

Результаты

Для практической проверки рассмотренного метода синтеза решающих правил с учетом количественных характеристик защитных свойств организма на различных его уровнях решалась задача синтеза решающих правил прогнозирования и ранней диагностики заболеваний нервной системы у работников предприятий электроэнергетики, порождаемых вредным воздействием на организм человека электромагнитных полей (ЭМП) промышленной частоты (ЭМППЧ). В качестве мишеней на уровне периферической нервной системы рассматривалась система управления сердечным ритмом (СУСР), а на уровне центральной нервной системы – когнитивная функция внимания. Функциональное состояние, функциональный резерв и уровень защиты СУСР по группе БАТ определялись по сочувственной и сигнальной точкам к меридиану сердца и по точкам меридиана сердца [19], [20]. Уровень защиты СУСР по показателям, традиционно принятым в адаптологии, определялся по спектральному относительному индексу (SI) и показателю активности регуляторных систем (ПАРС). Уровень защиты когнитивной функции внимания оценивался по БАТ С7 (седативная и пособник) и С3 (обычная точка) и при помощи программно-технического комплекса ПКФ-ВП для исследова-

ния свойств внимания и памяти, разработанного на кафедре БМИ ЮЗГУ [21] и использующего методики, основанные на анализе быстроты и устойчивости сенсорно-двигательных реакций, по которым физиологи определяют качество функционирования нейронов коры головного мозга.

Частные решающие правила оценки влияния ЭМПРЧ и других существенных факторов риска на состояние СУСР и свойства функции внимания определялись аналогично тому, как это было сделано в работе [7]. Финальные решающие правила имеют вид моделей (8), (9) и (10).

На заключительном этапе исследований была проведена экспериментальная проверка результатов исследования на репрезентативных контрольных выборках, которая показала, что для задач оценки уровня защиты системы управления сердечным ритмом и когнитивной функции внимания диагностическая чувствительность и специфичность превышают величину 0,95, для задач прогнозирования возникновения и развития заболеваний системы управления сердечным ритмом и когнитивной функции внимания показатели прогностической значимости не ниже 0,9 и для задач ранней диагностики исследуемого типа патологии показатели диагностической чувствительности, специфичности и эффективности превышают величину 0,95, что соответствует требованиям современной медицинской практики, предъявляемым к аналогичным классам задач.

Список литературы:

1. Сафронов Р.И., Родионова С.Н., Крикунова Е.В., Стародубцева Л.В., Сергеева С.С., Титова А.В. Использование показателей, характеризующих адаптационные механизмы, для оценки уровня защиты организма от воздействия внешних факторов риска // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия «Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение». 2021. № 4. С. 163-179.
2. Корневский Н.А., Родионова С.Н., Крикунова Е.В., Стародубцева Л.В., Скиданчук М.В. Количественная оценка защитных механизмов организма по его оксидантному статусу // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия «Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение». 2021. № 4. С. 146-162.
3. Кузьмина В.Е., Беляков В.И. Основы адаптологии / Учебное пособие. – Самара: Изд-во «Самарский университет», 2013. 206 с.
4. Курзанов А.Н., Заболотских А.Н., Ковалев Д.В., Бузищвили Д.А. Совершенствование оценки функциональных резервов организма – приоритетное направление развития донологической диагностики преморбидных состояний // Международный журнал экспериментального образования. 2015. Т. 10. № 1. С. 67-70.
5. Корневский Н.А., Сафронов Р.И., Серебровский В.И. Системы поддержки принятия решений врачей-профпатологов с гибридной нечеткой сетевой базой знаний. – Курск: Изд-во Курск. гос. с.-х. ак., 2021. 333 с.
6. Воробьева О.М., Мишустин В.Н., Чернова И.В. Синтез решающих правил для прогнозирования инфаркта миокарда по показателям перекисного окисления липидов и антиокислительной активности // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия «Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение». 2012. Т. 2. № 2. С. 249-252.
7. Мясоедова М.А. Прогнозирование и ранняя диагностика профессиональных заболеваний работников электроэнергетической отрасли на основе гибридных нечетких моделей / Дис. канд. техн. наук. – Курск, 2019. 162 с.
8. Григоров И.Ю. Методы и средства прогнозирования и ранней диагностики профессиональных заболеваний работников гальванических производств на основе нечетких моде-

- лей принятия решений / Дисс. канд. техн. наук. – Курск, 2020. 147 с.
9. *Zadeh L.A.* Advances in Fuzzy Mathematics and Engineering Fuzzy Sets and Fuzzy information-Granulation Theory. – Beijing: Beijing Normal University-Press, 2005. PP. 335-337.
 10. *Воронцов И.М., Шаповалов В.В., Шерстюк Ю.М.* Здоровье. Опыт разработки и обоснование применения автоматизированных систем для мониторинга и скринирующей диагностики нарушений здоровья. – СПб.: ООО «ИПК Коста», 2006. 432 с.
 11. *Mamdani E.N.* Application of fuzzy logic to approximate reasoning using linguistic synthesis // IEEE Transactions on Computers. 1977. Vol. 26. № 12. PP. 1182-1191.
 12. *Tanagi H., Sugeno M.* Fuzzy Identification of Systems and its Applications to Modeling and Control // IEEE Transactions on Systems Man and Cybernetics. 1985. № 15. PP. 116-132.
 13. *Корневский Н.А., Родионова С.Н., Хрипина И.И.* Методология синтеза гибридных нечетких решающих правил для медицинских интеллектуальных систем поддержки принятия решений. – Старый Оскол: ТНТ, 2019. 472 с.
 14. *Smith E.V., Smith M.S.* Introduction to Rasch Measurement Theory, Models and Applications. – Marle Grove, Minnesota: JAM Press, 2004. P. 689.
 15. *Курникова Н.А.* Способ оценки функциональных резервов организма / Патент 2342900 РФ. МПК А61В5/02, А61В5/021. № 2007138472/14; заявл. 18.10.2007; опубл. 10.01.2009. Бюл. № 1.
 16. *Баевский Р.М., Барсенева А.П.* Оценка адаптационных возможностей организма и риск развития заболеваний. – М.: Медицина, 1997. 235 с.
 17. *Баевский Р.М.* Прогнозирование состояний на грани нормы и патологии. – М.: Медицина, 1979. 298 с.
 18. *Шкатова Е.С., Магеровский М.А., Мухатиев Ю.Б.* Оценка функционального состояния и функционального резерва организма по энергетической сбалансированности меридианных структур / Сборник научных трудов по материалам VIII международной научно-практической конференции «Современные тенденции развития техники и технологии». – Белгород, 2015. Т. 2. № 8. С. 132-135.
 19. *Гаваа Л.* Традиционные и современные аспекты восточной рефлексотерапии. – М.: Наука, 1986. 575 с.
 20. *Говорухина Т.Н., Мясоедова М.А., Григоров И.Ю., Поляков А.В.* Математические модели прогнозирования и ранней диагностики заболеваний неравной системы, провоцируемых комбинированным воздействием разнородных факторов риска // Системный анализ и управление в биомедицинских системах. 2019. Т. 18. № 2. С. 145-153.
 21. *Поляков А.В.* Методы и средства прогнозирования и ранней диагностики когнитивной функции внимания / Дисс. канд. техн. наук. – Курск, 2020. 153 с.

*Николай Алексеевич Корневский,
д-р техн. наук, профессор, зав. кафедрой,
Софья Николаевна Родионова,
преподаватель,
кафедра биомедицинской инженерии,
ФГБОУ ВО «Юго-Западный
государственный университет»,
г. Курск,
Евгения Владимировна Крикунова,
преподаватель,
кафедра биомедицинской инженерии,
ФГБОУ ВО «Московский государственный
юридический университет им. О.Е. Кутафина»,
г. Москва,
Руслан Игоревич Сафронов,
канд. техн. наук, доцент,
кафедра электротехники и электроэнергетики,
ФГБОУ ВО «Курская государственная
сельскохозяйственная академия им. И.И. Иванова»,
Владимир Анатольевич Белозеров,
канд. мед. наук, врач отделения эндоскопии,
БМУ «Курская областная
клиническая больница»,
г. Курск,
e-mail: kstu-bmi@yandex.ru*

Е.В. Рябченко, Э.А. Миндубаев, А.А. Данилов

Быстрая оценка тепловой безопасности низкочастотных индуктивных систем передачи энергии для имплантируемых устройств

Аннотация

Численная оценка тепловой безопасности индуктивных систем передачи энергии требует значительных вычислительных затрат. В работе предложен метод, позволяющий существенно сократить вычислительные затраты. На первом шаге необходимо рассчитать нагрев для двух произвольных наборов характеристик системы индуктивной передачи энергии. В таком случае можно получить линейную аппроксимацию для зависимости «рассеиваемая мощность – температура», используя эти две точки. Затем можно получить термически оптимальные характеристики системы, подставляя значения требуемой температуры в полученное линейное уравнение. Показано, что этот метод обеспечивает достаточную точность и, следовательно, может использоваться в процедурах проектирования низкочастотных индуктивных систем передачи энергии для имплантируемых устройств.

Введение

Индуктивная передача энергии (ИПЭ) является перспективным способом питания имплантируемых устройств [1], [2]. Основными преимуществами данного метода являются значительно сниженный риск развития послеоперационных осложнений и повышение качества жизни пациентов [3]. Предыдущий опыт применения ИПЭ доказал рациональность его использования [4], [5]. Однако некоторые существенные пробле-

мы, касающиеся этого метода питания, до сих пор не решены. К ним относятся нагрев тканей в области имплантации, а также негативные последствия поглощения электромагнитного излучения тканями [6], [7]. Основным требованием по термобезопасности устройства является недопущение нагрева окружающих тканей до температуры 42 °С. Соблюдение этого требования уже представляет собой серьезную проблему. Более того, рекомендательные отраслевые стандарты определяют предельную величину нагрева тканей в 2 °С [8]. Поэтому раз-