

9. Knecht O., Bosshard R., Kolar J.W. High-Efficiency Transcutaneous Energy Transfer for Implantable Mechanical Heart Support Systems // IEEE Transactions on Power Electronics. 2015. Vol. 11. № 30. PP. 6221-6236.
10. Lazzi G. Thermal Effects of Bioimplants: Power Dissipation Characteristics and Computational Methods // IEEE Engineering in Medicine and Biology Magazine. 2005. Vol. 24. № 5. PP. 75-81.
11. Mussivand T., Miller J.A., Santerre P.J., Belanger G., Rajagopalan K.C., Hendry P.J., Keon W.J. Transcutaneous Energy Transfer System Performance Evaluation // Artificial Organs. 2008. Vol. 17. № 11. PP. 940-947.
12. ГОСТ Р ИСО 14708-1–2012 Имплантаты хирургические. Активные имплантируемые медицинские изделия. Общие требования к безопасности, маркировке и информации, предоставляемой изготовителем.
13. Lovik R.D., Abraham J.P., Sparrow E.M. Potential tissue damage from transcutaneous recharge of neuromodulation implants // International Journal of Heat and Mass Transfer. 2009. Vol. 52. PP. 3518-3524.
14. Smith D.K., Lovik R.D., Sparrow E.M., Abraham J.P. Human tissue temperatures achieved during recharging of new-generation neuromodulation devices // International Journal of Heat and Mass Transfer. 2010. Vol. 53. PP. 3292-3299.
15. Danilov A.A., Mindubaev E.A., Gurov K.O., Aubakirov R.R., Surkov O.A., Ryabchenko E.V., Selishchev S.V. A Device for Wireless Powering of Battery-Free Implants via Inductive Coupling // Biomedical Engineering. 2020. Vol. 53. № 5. PP. 309-311.
16. Danilov A.A., Mindubaev E.A., Gurov K.O., Ryabchenko E.V. Modeling of Tissue Heating by Wireless Power Supply Units of Batteryless Implants // Biomedical Engineering. 2018. Vol. 52. № 4. PP. 267-270.

Екатерина Викторовна Рябченко,
магистрант,
Эдуард Адипович Миндубаев,
доцент,
Арсений Анатольевич Данилов,
канд. физ.-мат. наук, доцент,
Институт биомедицинских систем,
Национальный исследовательский университет МИЭТ
г. Москва, г. Зеленоград,
e-mail: caterinco@mail.ru

Н.А. Корневский, А.В. Быков, С.Н. Родионова, М.В. Артеменко

Математические модели оценки степени тяжести поражения сердца, головного мозга и нижних конечностей под влиянием ремоделирования центральной гемодинамической системы в условиях системного ишемического процесса

Аннотация

Получены математические модели, позволяющие дифференцировать степень тяжести ишемического поражения по четырем классам: норма, латентное, реверсивное и критическое состояния по нижним конечностям, сердцу и головному мозгу.

В результате математического моделирования и статистических испытаний было показано, что для всех выбранных классов степени тяжести уверенность в правильном принятии решений превышает величину 0,9, что позволяет рекомендовать полученные результаты к применению в клинической практике сосудистых хирургов и врачей-ангиологов.

Введение

Среди заболеваний сердечно-сосудистой системы, приводящих к инвалидности и смерти, значительное место занимают ишемические заболевания центральной и периферической кровеносных систем.

Значительное количество исследований, связанных с ишемическим поражением, ориентировано на исследование и борьбу с ишемическим поражением отдельно взятых органов и систем [1], [2].

Однако на практике часто встречаются ситуации, связанные с системными ишемическими поражениями, одновременно затрагивающими центральную гемодинамическую систему, сердце, головной мозг и нижние конечности [3]-[5].

Специально проведенные исследования показали, что патологические состояния сердца и сосудов, включая сосуды головного мозга и нижних конечностей, сосуществуют длительно, приобретая хроническую взаимоотношающую связь. При этом нарушения регионарной гемодинамики определяют центральную гемодинамику, а изменения последней усугубляют состояние органов [3], [4].

Анализ известной отечественной и зарубежной литературы показывает, что вопросы рациональной тактики ведения больных с сочетанной ишемической патологией центральной гемодинамической системы (ЦГС), сердца (С), головного моз-

га (М) и нижних конечностей (К) изучены недостаточно глубоко, что существенно снижает качество медицинского обслуживания пациентов с системной ишемической патологией.

Одной из составляющих повышения эффективности оказания медицинской помощи пациентам, страдающим ишемией, является своевременная и точная оценка степени тяжести течения заболевания, что позволяет выбирать адекватные схемы профилактики и лечения [4], [5].

С учетом этого целью рассматриваемой работы является синтез математических моделей оценки степени тяжести ишемического поражения сердца, головного мозга и нижних конечностей под влиянием ишемического ремодулирования центральной гемодинамической системы.

Медицинская поддержка работы выполнялась экспертной группой врачей под руководством доктора А. Быкова.

Методы и модели оценки степени тяжести системного ишемического поражения

Для синтеза математических моделей оценки степени тяжести ишемического поражения центральной гемодинамической системы, сердца, головного мозга и нижних конечностей в течение восьми лет (2011...2018 гг.) было организовано наблюдение за 450 больными с ишемическими поражениями различных органов и систем, включая сочетанные варианты исследуемой патологии, из областной клинической больницы

№ 1 г. Курска. В качестве контрольной группы было организовано наблюдение за 100 здоровыми добровольцами (донорами).

В ходе проведенных исследований было выявлено, что задача оценки степени тяжести системного ишемического поражения относится к классу плохоформализуемых задач с аналитически неопределенной зоной пересечения исследуемых классов состояний. Это хорошо согласуется с результатами исследований, приведенными в работах [3]-[6].

В этих условиях, согласно рекомендациям [7]-[12], в качестве базового математического аппарата была выбрана методология синтеза гибридных нечетких решающих правил [6], [7], [10], [11].

Используя данную методологию, мы получили систему нечетких решающих правил оценки степени тяжести ишемического поражения сердца, головного мозга и нижних конечностей [3], [5]. Степень тяжести ишемического поражения центральной гемодинамической системы $ST_{\text{ц}}$ определяется через комплексный показатель ЦГС, определяемый выражением [6]

$$\text{ЦГС} = \frac{\text{САД} [\text{Ca}^{2+}] \cdot \text{ЧСС}}{30000} + 10 \frac{\Delta \text{АД}}{\text{АЧТВ}}, \quad (1)$$

где САД – систолическое АД в данный момент времени, мм рт. ст.; ЧСС – частота сердечных сокращений, удар/мин; $\Delta \text{АД}$ – разница давлений, измеренных в настоящее время и три дня назад, мм рт. ст.; АЧТВ – активированное частичное тромбoplastиновое время, с; $[\text{Ca}^{2+}]$ – концентрация Ca^{2+} в крови, моль/л.

По показателю ЦГС на экспертном уровне с учетом рекомендации [8] было получено выражение для $ST_{\text{ц}}$:

$$ST_{\text{ц}} = \begin{cases} 0, & \text{если } \text{ЦГС} < 8; \\ 0,07, & \text{ЦГС} - 0,55, \text{ если } 8 \leq \text{ЦГС} < 21; \\ 0,9, & \text{если } \text{ЦГС} \geq 21. \end{cases} \quad (2)$$

Для оценки степени тяжести ишемического поражения сердца $ST_{\text{с}}$, головного мозга $ST_{\text{м}}$ и нижних конечностей $ST_{\text{к}}$ по каждому из перечисленных органов были определены нечеткие модели оценки уровня тяжести ишемического поражения сердца $U_{\text{с}}$, головного мозга $U_{\text{м}}$ и нижних конечностей $U_{\text{к}}$ в виде модифицированных итерационных формул Е. Шортлифа:

$$U_{\text{с}}(i+1) = U_{\text{с}}(i) + f_{\text{с}}(X_{i+1})[1 - U_{\text{с}}(i)], \quad (3)$$

$$f_{\text{с}}(X_1) = \begin{cases} 0,15, & \text{если } X_1 < -3; \\ -0,05X_1, & \text{если } -3 \leq X_1 < 0; \\ 0, & \text{если } 0 \leq X_1 < 3; \\ 0,02X_1 - 0,06, & \text{если } 3 \leq X_1 < 6; \\ 0,06, & \text{если } X_1 \geq 6, \end{cases}$$

$$f_{\text{с}}(X_2) = \begin{cases} 0,2, & \text{если } X_2 < -2; \\ -0,125X_2, & \text{если } -2 \leq X_2 < 0; \\ 0,19X_2, & \text{если } 0 \leq X_2 < 1; \\ 0,19, & \text{если } X_2 \geq 1; \end{cases}$$

$$f_{\text{с}}(X_3) = \begin{cases} 0, & \text{если } X_3 < 180; \\ 0,0011X_3 - 0,2, & \text{если } 180 \leq X_3 < 400; \\ 0,25, & \text{если } X_3 \geq 400; \end{cases}$$

$$f_{\text{с}}(X_4) = \begin{cases} 0, & \text{если } X_4 < 0,1; \\ 0,3 \frac{(X_4 - 0,1)^2}{24}, & \text{если } 0,1 \leq X_4 < 2,5; \\ 0,15 \left[1 - 2 \frac{(X_4 - 5)^2}{24} \right], & \text{если } 2,5 \leq X_4 < 5; \\ 0,15, & \text{если } X_4 \geq 5, \end{cases}$$

где $U_{\text{с}}(1) = f_{\text{с}}(X_1)$; X_1 – амплитуда Т-зубца; X_2 – смещение сегмента ST относительно изолинии; X_3 – концентрация креатинфосфокиназы; X_4 – концентрация тропонин Т; $f_{\text{с}}(X_i)$ – частные функции уровня тяжести ишемического процесса в сердце по каждому из признаков X_i .

Интегральный уровень тяжести ишемического процесса головного мозга определяется системой выражений вида

$$U_{\text{м}}(i+1) = U_{\text{м}}(i) + f_{\text{м}}(Y_{i+1})[1 - U_{\text{м}}(i)], \quad (4)$$

$$f_{\text{м}}(Y_1) = \begin{cases} 0,15, & \text{если } 60 < Y_1; \\ -0,0025Y_1 + 0,3, & \text{если } 60 \leq Y_1 < 120; \\ 0,0018Y_1 - 0,218, & \text{если } 120 \leq Y_1 < 230; \\ 0,2, & \text{если } Y_1 \geq 230; \end{cases}$$

$$f_{\text{м}}(Y_2) = \begin{cases} 0,15, & \text{если } 70 < Y_2; \\ 0,0021Y_2 - 0,3, & \text{если } 70 \leq Y_2 < 140; \\ 0,0029Y_2 - 0,4, & \text{если } 140 \leq Y_2 < 210; \\ 0,2, & \text{если } Y_2 \geq 210; \end{cases}$$

$$f_{\text{м}}(Y_3) = \begin{cases} 0,15, & \text{если } 20 < Y_3; \\ -0,0011Y_3 + 0,172, & \text{если } 20 \leq Y_3 < 155; \\ 0,0031Y_3 - 0,477, & \text{если } 155 \leq Y_3 < 220; \\ 0,2, & \text{если } Y_3 \geq 220, \end{cases}$$

где $U_{\text{м}}(1) = f_{\text{м}}(Y_1)$; Y_1 – пиковая систолическая скорость кровотока (ПССК) внутренней сонной артерии; Y_2 – ПССК позвоночной артерии; Y_3 – ПССК средней мозговой артерии; $f_{\text{м}}(Y_i)$ – частные функции уровня тяжести ишемического поражения головного мозга по каждому из признаков Y_i ;

$$U_{\text{к}}(i+1) = U_{\text{к}}(i) + f_{\text{к}}(q_{i+1})[1 - U_{\text{к}}(i)], \quad (5)$$

$$f_{\text{к}}(q_1) = \begin{cases} 0,25, & \text{если } q_1 < 0,4; \\ 0,25 \left[1 - 2 \frac{(q_1 - 0,4)^2}{0,16} \right], & \text{если } 0,4 \leq q_1 < 0,6; \\ 0,25 \frac{(q_1 - 0,8)^2}{0,16}, & \text{если } 0,6 \leq q_1 < 0,8; \\ 0, & \text{если } q_1 \geq 0,8; \end{cases}$$

$$f_{\text{к}}(q_2) = \begin{cases} 0,25, & \text{если } 0,2 < q_2; \\ -1,25q_2 + 0,5, & \text{если } 0,2 \leq q_2 < 0,4; \\ 0, & \text{если } q_2 \geq 0,4; \end{cases}$$

$$f_K(q_3) = \begin{cases} 0, & \text{если } 0,1 < q_3; \\ 0,4 \frac{(q_3 - 0,1)^2}{396}, & \text{если } 0,1 \leq q_3 < 10; \\ 0,2 \left[1 - 2 \frac{(q_3 - 20)^2}{396} \right], & \text{если } 10 \leq q_3 < 20; \\ 0,2, & \text{если } q_3 \geq 20, \end{cases}$$

где $U_K(1) = f_K(q_1)$; q_1 – лодыжечно-плечевой индекс (ЛПИ); q_2 – пальцево-плечевой индекс (ППИ); q_3 – ЛПИ Тредмил-тест; $f_K(q_1)$ – частные функции уровня тяжести ишемического поражения головного мозга по признакам q_i .

Учет влияния ишемического поражения центральной гемодинамической системы на степень тяжести ишемического поражения сердца, головного мозга и нижних конечностей осуществляется с использованием комбинированных моделей вида

$$ST_C = U_C + ST_{Ц} - U_C \cdot ST_{Ц}; \quad (6)$$

$$ST_M = U_M + ST_{Ц} - U_M \cdot ST_{Ц}; \quad (7)$$

$$ST_K = U_K + ST_{Ц} - U_K \cdot ST_{Ц}; \quad (8)$$

Для удобства выбора схем профилактики и лечения ишемических поражений эксперты, пользуясь рекомендациями работ [4]-[6], на шкалах ST_C , ST_M и ST_K определили функции принадлежности к следующим классам степени тяжести: ω_n – нормальное состояние, ω_l – латентное состояние, ω_p – реверсивное состояние, ω_k – критическое состояние.

Для базовых переменных ST_C , ST_H и ST_K определен набор функций принадлежности: для нижних конечностей – $\mu_H(ST_K)$,

$\mu_L(ST_K)$, $\mu_P(ST_K)$, $\mu_K(ST_K)$; для сердца – $\mu_H(ST_C)$, $\mu_L(ST_C)$, $\mu_P(ST_C)$, $\mu_K(ST_C)$; для головного мозга – $\mu_H(ST_M)$, $\mu_L(ST_M)$, $\mu_P(ST_M)$, $\mu_K(ST_M)$.

Графики перечисленных функций принадлежности представлены на рис. 1.

Решение о классификации [принадлежности к одному из классов ω_l ($l = n, l, p, k$)] принимается в пользу класса, имеющего максимальную величину функции принадлежности.

При равенстве двух функций принадлежности по органу решение принимается в пользу более тяжелой степени.

Результаты

Математическое моделирование и экспертное оценивание показали, что уверенность в классификации по всем классам степени тяжести превысила величину 0,9, что позволяет рекомендовать полученные модели в практику сосудистых хирургов и врачей-кардиологов.

Для подтверждения приемлемых показателей качества принимаемых решений в ходе проводимых исследований были сформированы репрезентативные контрольные выборки (по 100 пациентов на каждый альтернативный класс), по которым определялось количество ошибок, «совершенных» полученными математическими моделями.

Результаты «испытаний» диагностических возможностей математических моделей с базовыми переменными (6), (7) и (8) приведены в табл. 1.

Анализ полученных значений показателей качества (правая часть табл. 1) показывает, что они несколько превышают результаты математического моделирования и экспертного оценивания.

Заключение

Полученные в работе математические модели позволяют дифференцировать степень тяжести ишемического поражения

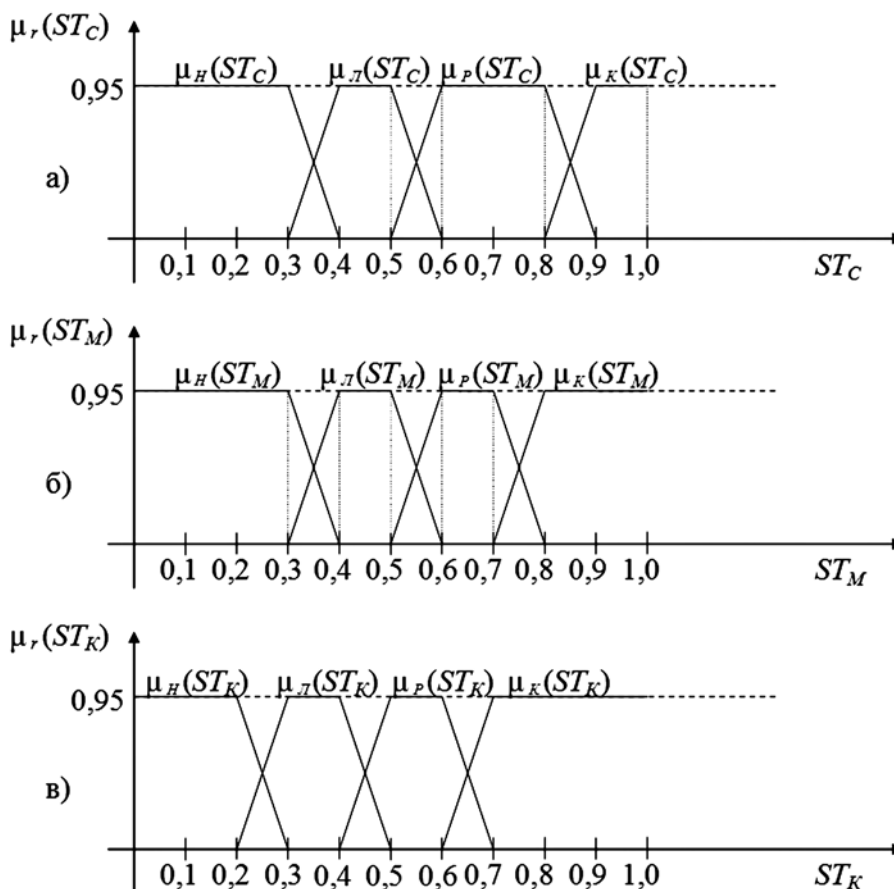


Рис. 1. Графики функций принадлежности к степеням тяжести ишемии: а) сердца; б) головного мозга; в) нижних конечностей

по четырем классам: норма, латентное, реверсивное и критическое состояния по нижним конечностям, сердцу и головному мозгу.

В результате математического моделирования и статистических испытаний было показано, что для всех выбранных классов степени тяжести уверенность в правильном принятии решений превышает величину 0,9. Это является хорошим результатом для решения поставленной в работе цели.

Таблица 1

Результаты «испытаний» качества работы математических моделей оценки степени тяжести ишемического поражения

Орган	Класс	Результаты		Показатели качества		
		положительные	отрицательные	ДЧ	ДС	ДЭ
Сердце	ω_H	96	4	0,96	0,97	0,96
	ω_{AH}	3	97			
	ω_L	95	5	0,95	0,96	0,95
	ω_{AL}	4	96			
	ω_P	91	9	0,91	0,97	0,94
	ω_{AP}	–	–	–	–	–
	ω_K	3	97	–	–	–
	ω_{AK}	–	–	–	–	–
Головной мозг	ω_H	95	5	0,95	0,92	0,93
	ω_{AH}	8	92	–	–	–
	ω_L	91	9	0,91	0,92	0,91
	ω_{AL}	8	92	–	–	–
	ω_P	90	10	0,9	0,92	0,91
	ω_{AP}	8	92	–	–	–
	ω_K	93	7	0,93	0,91	0,92
	ω_{AK}	9	91	–	–	–
Нижние конечности	ω_H	97	3	0,97	0,96	0,96
	ω_{AH}	4	96	–	–	–
	ω_L	95	5	0,95	0,93	0,94
	ω_{AL}	7	93	–	–	–
	ω_P	92	8	0,92	0,91	0,91
	ω_{AP}	9	91	–	–	–
	ω_K	94	6	0,94	0,93	0,93
	ω_{AK}	7	93	–	–	–

Примечание – ω_{Al} – альтернативный классу ω_i класс состояний.

Список литературы:

1. Савельев В.С., Кошкин В.М., Каралкин А.В. Патогенез и консервативное лечение тяжелых стадий облитерирующего атеросклероза артерий нижних конечностей. Руководство для врачей. – М.: ООО «Медицинское информационное агентство», 2010. 216 с.
2. Савельева В.С., Кириенко А.И. Сосудистая хирургия [электронный ресурс]. Национальное руководство. Краткое издание / Под ред. В.С. Савельевой, А.И. Кириенко. – М.: ГЭОТАР-Медиа, 2015. 464 с.

3. Быков А.В., Устинов А.Г., Хрипина И.И. Модель прогнозирования возникновения осложнений ишемии нижних конечностей путем оценки функционального резерва организма // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2015. № 4 (17). С. 81-88.
4. Быков А.В., Корневский Н.А., Емельянов С.Г. Прогнозирование степени тяжести ишемического процесса сердца, головного мозга и нижних конечностей // Биомедицинская радиоэлектроника. 2016. № 9. С. 4-9.
5. Быков А.В., Корневский Н.А., Корневская С.Н., Филатова О.И. Способ комплексной терапии при сочетанной ишемии центральной гемодинамической системы, нижних конечностей, сердца и головного мозга / Патент РФ № 2478968. 2018. Бюл. № 33.
6. Быков А.В., Корневский Н.А. Способ прогнозирования степени тяжести ишемического процесса сердца, головного мозга и нижних конечностей / Патент РФ № 24788968. 2018. Бюл. № 9.
7. Корневский Н.А., Родионова С.Н., Хрипина И.И. Методология синтеза гибридных нечетких решающих правил для медицинских интеллектуальных систем поддержки принятия решений. Монография. – Старый Оскол: ТНТ, 2019. 472 с.
8. Корневский Н.А., Шуткин А.Н., Горбатенко С.А., Серебровский В.И. Оценка и управление состоянием здоровья обучающихся на основе гибридных интеллектуальных технологий. Монография. – Старый Оскол: ТНТ, 2016. 472 с.
9. Корневский Н.А. Метод синтеза гетерогенных нечетких правил для анализа и управления состоянием биотехнических систем // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2013. № 2. С. 99-103.
10. Корневский Н.А. Использование нечеткой логики принятия решений для медицинских экспертных систем // Медицинская техника. 2015. № 1 (289). С. 33-35.
11. Корневский Н.А., Разумова К.В. Синтез коллективов гибридных нечетких моделей оценки состояния сложных систем // Научные технологии. 2014. Т. 15. № 12. С. 31-40.
12. Корневский Н.А., Рябова 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.

Николай Алексеевич Корневский,
д-р техн. наук, профессор, зав. кафедрой,
Александр Владимирович Быков,
канд. мед. наук, доцент,
Софья Николаевна Родионова,
аспирант,
Михаил Владимирович Артеменко,
канд. биолог. наук, доцент,
кафедра биомедицинской инженерии,
ФГБОУ ВО «Юго-Западный
государственный университет»,
г. Курск,
e-mail: kstu-bmi@yandex.ru