

Диагностика текущего состояния динамических объектов и систем сложной структуры методами нечеткой логики с использованием имитационных моделей¹

Аннотация. Рассматривается методика построения двух- и трехуровневых систем диагностики текущего состояния динамического объекта сложной параллельно-последовательной структуры на базе нечеткого логического вывода с использованием дополнительных признаков в виде параметров подстраиваемой динамической модели.

Ключевые слова: динамический объект сложной структуры, нечеткий логический вывод, имитационная подстраиваемая модель, экспертная система диагностики.

Введение

Диагностика неисправностей в функционирующих сложных динамических объектах и системах является известной проблемой. К сложным объектам может быть отнесено большое число объектов разной природы. Для этих объектов характерно отсутствие достаточно полного математического описания, ограниченное число регистрируемых координат, большая размерность, нелинейность статических характеристик, параллельность структуры, отсутствие описания динамических свойств. Одной из ключевых проблем диагностики таких объектов является отсутствие достаточного количества значимых признаков. Для диагностики подобных объектов используются различные подходы, базирующиеся на методах искусственного интеллекта (ИИ). В основу этих методов закладывается знания и опыт экспертов, анализирующих текущее состояние объекта по виду наблюдаемых переходных процессов. Причем эти знания могут быть как на уровне интуиции, так и в виде формализованных признаков. При этом большое распространение получил подход на основе мягких

вычислений [1]. Однако в случае недостатка формализованных признаков этот подход оказывается малоэффективным, а в случае избыточности признаков повышается размерность задачи и падает эффективность из-за того, что области изменения параметров для многих неисправностей оказываются пересекающимися. Подобная ситуация характерна для объектов параллельной структуры, когда в переходных процессах наблюдается суммарное проявление параллельно работающих компонент объекта. Примерами таких объектов могут выступать как технические, так и некоторые биологические объекты. Так входные и выходные контролируемые параметры газа компрессорного цеха с параллельно работающими компрессорами в стационарном режиме не позволяют оценить текущее техническое состояние каждого конкретного компрессора. Пока такая оценка делается расчетным путем и далека от совершенства [2]. Примером биологического объекта служит сетчатка человеческого глаза, которая может быть представлена в виде динамического объекта с параллельной структурой, определяемой клеточным строением сетчатки [3]. Диагностика патологий сетчатки производится

¹ Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект № 10-01-00049а).

по характерным точкам переходного процесса, представляемого в виде электроретинограммы (ЭРГ), в ответ на воздействие светового импульса. В так называемой «общей ЭРГ» регистрируется суммарный отклик всех параллельных слоев сетчатки, вклад каждого из которых зафиксировать технически невозможно. По виду этой суммарной реакции сложно определить вклад каждого слоя и, соответственно, состояние этих слоев.

Сложные динамические объекты характеризуются ограниченным числом контролируемых параметров, высокой размерностью, разветвленной структурой, нелинейными характеристиками, отсутствием адекватного математического описания.

Диагностические системы для оценки текущего состояния сложных динамических объектов можно условно разделить на три дополняющих друг друга группы:

- системы, базирующиеся на классических статистических методах [4];
- системы, аккумулирующие знания и опыт специалистов–профессионалов (экспертов) и различные подходы на основе методов ИИ (нейронные сети, вероятностные методы в виде диагностических байесовских сетей доверия, теории свидетельств Демпстера-Шефера и т.д.) [5, 6];
- системы, базирующиеся на мягких вычислениях (нечеткой логике), в которых для построения так же используется опыт экспертов [7, 8].

Все рассматриваемые группы диагностических систем изначально не требуют для своего функционирования никаких предварительных знаний о процессах, протекающих в диагностируемом объекте. Однако указанное обстоятельство сильно затягивает и усложняет процесс построения достаточно эффективной диагностической системы для конкретного объекта.

Сложность заключается в том, что, если объект остается работоспособным, но его функционирование по каким-либо признакам начинает отличаться от штатного, то зачастую эти признаки не фиксируются в стационарном режиме. Например, изменение какой-либо постоянной времени или изменение статических характеристик одного из параллельно работающих газоперекачивающих агрегатов (ГПА) в процессе стационарной работы компрессорного цеха (КЦ) практически никак не отслеживается. А знание этих характеристик играет большую роль, как в предупреждении аварий-

ных ситуаций, так и в экономичности работы КЦ. На практике текущее состояние ГПА учитывается по интегральным коэффициентам технического состояния, определяемым расчетным путем по формулам, принятым для расчета в ведомстве. Однако эти коэффициенты недостаточно характеризуют текущее состояние данного, конкретного ГПА.

Во многих случаях опыт и интуиция обслуживающего персонала (ЛПР – лица, принимающего решения) играют ключевую роль в своевременном выявлении и устранении неисправностей. На основании такого опыта разрабатываются алгоритмы поиска неисправностей сложной техники для менее квалифицированных работников. Однако наборы неформализованных признаков часто характеризуют целые группы возможных неисправностей. Что касается формализованных признаков, характеризующих средними значениями и областями отклонений, то во многих случаях эти области пересекаются для разного рода неисправностей, что осложняет применение классических статистических методов, если один и тот же вид неисправности может быть порожден различными причинами. Кроме этого, зачастую, отсутствуют достаточные объемы выборок для уверенного использования статистических методов диагностики. Данная ситуация особенно характерна, как уже отмечалось, для динамических объектов параллельной структуры.

В силу указанных обстоятельств представляется важным проработка вопроса о повышении эффективности работы диагностических систем за счет использования при их построении дополнительной информации о функционировании объекта по данным имитационной модели.

Информацией в виде дополнительных признаков здесь могут служить те коэффициенты модели, которые ощутимо меняются в зависимости от вида неисправности. Коэффициенты модели должны подстраиваться таким образом, чтобы наблюдаемые процессы на выходе объекта и модели были бы достаточно близкими. В переходном процессе на выходе объекта параллельной структуры оператору визуально достаточно сложно выявлять особенности динамики отдельных составляющих структуры, а коэффициенты адекватной имитационной модели могут содержать такую информацию.

Имитационные модели с разной степенью приближения могут описывать процессы, про-

исходящие в структуре сложного динамического объекта. Это в первую очередь зависит от степени изученности динамических свойств объекта. Для ряда объектов (например, летательные аппараты) степень изученности относительно высока [9]; для электроприводного ГПА достаточно хорошо изучены статические свойства, но отсутствуют адекватные описания его динамических свойств, подтвержденные экспериментально [2]; для ряда биологических объектов (например, сетчатка глаза) вообще отсутствует какое-либо описание его динамики по виду регистрируемых переходных процессов (ЭРГ).

Построение имитационных моделей подобных объектов может вестись с единых позиций, принятых в теории управления, когда изучаемый объект на начальном этапе рассматривается как «черный ящик», а далее в процессе изучения его свойств, строится и уточняется его имитационная модель.

Постановка задач, связанных с диагностикой текущего состояния таких сложных динамических объектов как КЦ с параллельно работающими компрессорами или сетчатка глаза в виде параллельно работающих клеточных слоев (компонент), в целом схожа. В данной работе показывается возможность построения диагностической системы на базе нечеткого логического вывода для оценки текущего состояния (патологий) сетчатки глаза с использованием дополнительных признаков в виде параметров подстраиваемой динамической модели объекта [10-12]. При этом используются как характер-

ные признаки, извлекаемые из наблюдаемой ЭРГ, так и дополнительные признаки в виде параметров подстраиваемой динамической модели сетчатки [10]. Подобные исследования по своей постановке могут оказаться одинаково применимыми как к техническим, так и к некоторым биологическим объектам.

1. Построение системы диагностики патологий сетчатки глаза на базе нечеткого логического вывода по признакам, извлекаемым из ЭРГ

С появлением аппаратуры, позволяющей регистрировать отклики сетчатки в виде биоэлектрических потенциалов на световые раздражители (в виде ЭРГ), диагностирование патологий сетчатки вышло на новый качественный уровень. Появилась возможность получения формализованных признаков текущего состояния исследуемого объекта, которые позволяют воспользоваться методами нечеткой логики для построения диагностических систем. По существу диагностика биологического объекта по откликам, регистрируемым компьютерной аппаратурой, не отличается от диагностики технического объекта с неизвестным математическим описанием. На Рис.1 слева представлено изображение общей ЭРГ, представляющее собой реакцию большинства клеток сетчатки на включение света, справа - на одиночный световой импульс. Наиболее полным считается представление ЭРГ в виде суммы четырех компонент

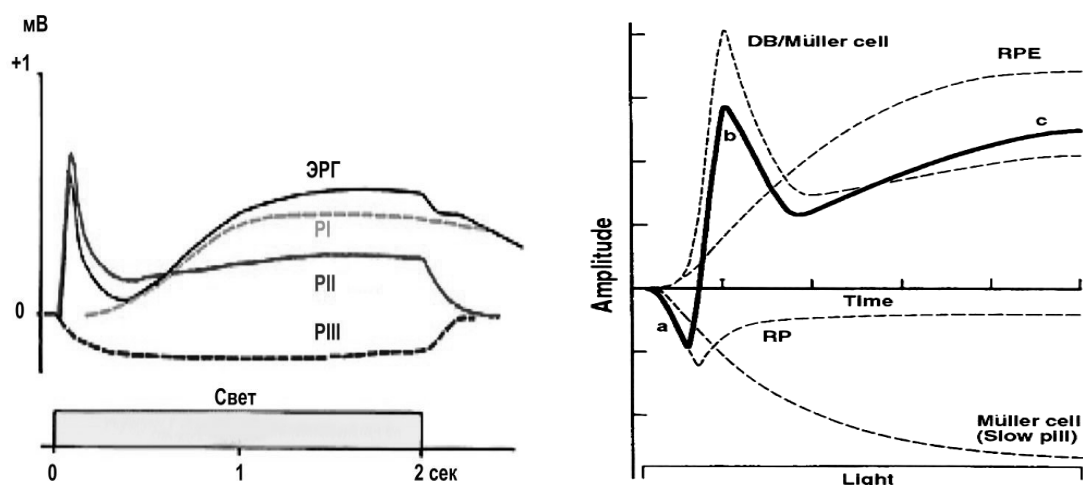


Рис. 1. Общий вид ЭРГ и ее компонентов

известное как «компонентный анализ» [3]. На Рис.1. показаны ЭРГ и составляющие ее компоненты. Согласно компонентному анализу, в генерацию ЭРГ дают вклад три компонента: РІ, РІІ и РІІІ. В свою очередь РІ представляет собой сумму двух медленно меняющихся составляющих разных знаков. Лидирующий (передний) фронт ЭРГ (так называемая «негативная a -волна») является в основном начальной ветвью негативного РІІІ компонента. «Позитивная b -волна» отражает сумму РІІ и РІІІ, а медленно развивающаяся « c -волна» является результатом суммирования РІ и РІІІ компонентов.

Таким образом, ЭРГ на одиночную вспышку является суммарным ответом различных клеток сетчатки. Основными компонентами ЭРГ являются a - и b -волны и две разно-полярные, относительно медленно меняющиеся составляющие, определяющие c -волну.

Основная, информативная часть общей ЭРГ рассматривается на участке до 100 мс (a и b -волны), так как остальная, медленная часть этой ЭРГ (c -волна) очень нестабильна во времени из-за возможных смаргиваний пациента.

В оценке ЭРГ на одиночный световой импульс фиксируются только амплитудные и временные параметры минимума (a -волна) и параметры максимума (b -волна), без учета конфигурации волн, их фронтов.

С точки зрения экспертов-физиологов, наибольшую информацию о характере патологий несут ординаты и абсциссы первых двух экстремумов ЭРГ:

$$U_a = \min U_{\text{ЭРГ}}(t), t_a = \arg \min U_{\text{ЭРГ}}(t), U_b = \max U_{\text{ЭРГ}}(t), t_b = \arg \max U_{\text{ЭРГ}}(t).$$

Отметим, что координаты экстремумов общей ЭРГ (так называемые кульминации a и b -волн) зависят от всех четырех компонент и, очевидно, существует бесконечное множество сочетаний их мгновенных значений, приводящих к одним и тем же координатам экстремумов, что, в конечном итоге, затрудняет диагностику по столь ограниченному числу признаков.

На Рис. 2 представлены распределения значений признаков по диагнозам (категориям). Здесь и далее по тексту используются следующие сокращения для диагнозов: N - норма, GL - глаукома, DRP - диабетическая ретинопатия, RD - отслойка сетчатки, RP - пигментный ретинит, SD - рассеянный склероз, XR-R - X-хромосомный ретиношизис. При решении данной задачи диагностики, были собраны данные о параметрах общей ЭРГ для 180 пациентов.

По распределению значений параметров видно, что диапазоны распределения по категориям сильно смешаны между собой, и ЛПР

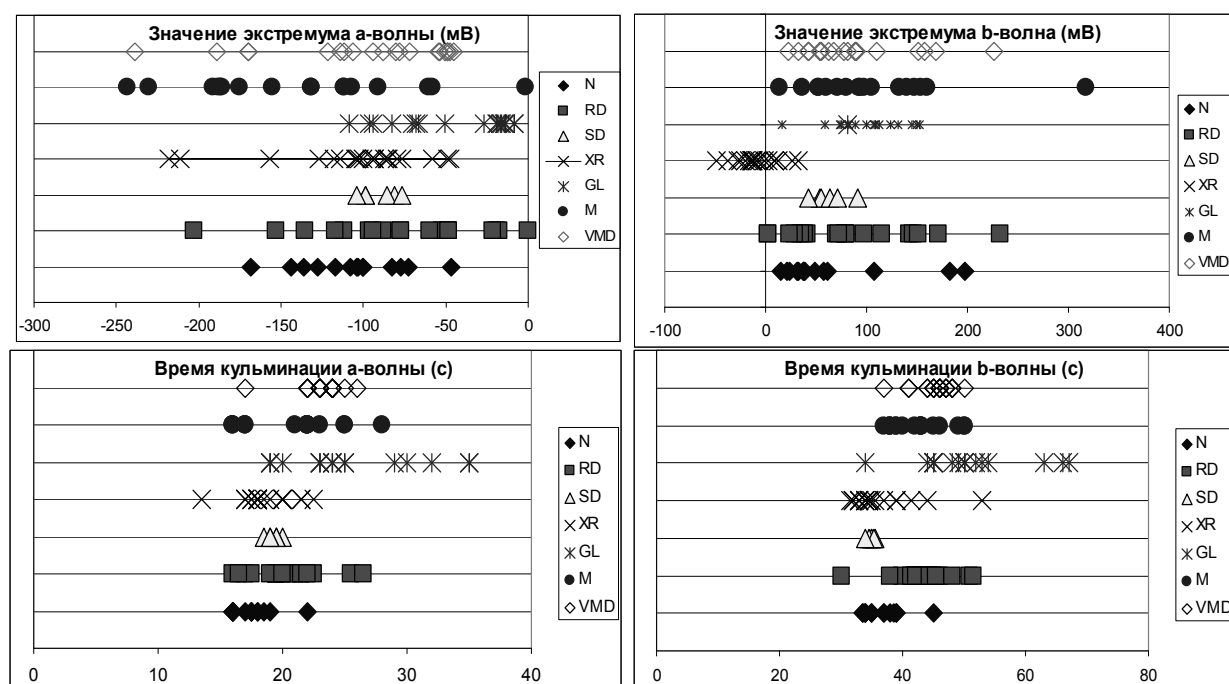


Рис. 2. Распределение значений временных параметров ЭРГ по диагнозам (категориям)

(врачу) фактически невозможно диагностировать пациента по одному лишь признаку. Смешанность значений параметров и относительно малая выборка их предполагают искать решение задачи в виде нечеткого множества. Ранее на основе одной общей ЭРГ диагностика не проводилась.

Каждому диагнозу предлагается приписывать некоторую степень принадлежности. Иными словами, необходимо построить нечеткую ситуационную советующую систему, в которой пространству предпосылок (набору значений U_a , t_a , U_b , t_b) ставится в соответствие пространство заключений (множество предположительных диагнозов).

При решении данной задачи с помощью экспертов были отобраны группы ЭРГ, соответствующие тому или иному диагнозу, и для каждой группы были определены усредненные значения U_a , t_a , U_b , t_b (Табл. 1).

Для построения алгоритма нечеткого логического вывода сформируем лингвистические переменные:

- < «Минимум ЭРГ», A , $[-140; 0]$ > ,
- < «Время минимума», T_a , $[0; 44]$ > ,
- < «Максимум ЭРГ», B , $[-5; 215]$ > ,
- < «Время максимума», T_b , $[0; 75]$ > ,

где A , T_a , B , T_b – терм-множества лингвистических переменных.

В данной работе используется упрощенное определение лингвистической переменной как тройки $\langle \beta, T(\beta), X \rangle$, где β – название лингвистической переменной, $T(\beta)$ – ее терм-множество, X – область определения (универсальное множество) [13]. Семантическое правило, которое ставит в соответствие каждой нечеткой переменной нечеткое множество определено ниже в виде функций принадлежности. Синтаксическое правило, порождающее наименования вербальных значений лингвистической переменной для решения данной задачи представляется излишним, поэтому оно не вводится в рассмотрение.

Количество термов в терм-множествах, с одной стороны, должно быть достаточным для того, чтобы ЛПР можно было вполне уверенно различать те или иные патологии. С другой стороны, оно не должно быть слишком большим, поскольку это может привести к неоправданному увеличению типовых ситуаций и, как следствие, существенному усложнению расчетов.

Табл. 1. Усредненные параметры экстремумов ЭРГ для различных патологий сетчатки

№	Шифр	a-волна		b-волна	
		U_a (мкВ)	t_a (мс)	U_b (мкВ)	t_b (мс)
1	N	-119	17	106	36
2	GL	-82	20	199	56
3	DRP	-23	23	159	74
4	RD	-79	20	95	45
5	RP	-33	25	21	55
6	XR_R	-87	18	4	34
7	SD	-93	18	66	37

Исходя из этих соображений и учитывая разброс параметров, для лингвистических переменных «Минимум ЭРГ» и «Максимум ЭРГ» выбрано количество термов, равное трем, а для переменных «Время минимума» и «Время максимума» – равное двум:

$$A = \{NB, NM, NS\}, T_a = \{S, B\}, B = \{PS, PM, PB\}, T_b = \{S, B\},$$

где S – «Малое», B – «Большое», NB – «Отрицательное большое», NM – «Отрицательное среднее», NS – «Отрицательное малое», PS – «Положительное малое», PM – «Положительное среднее», PB – «Положительное большое».

На основе данных, приведенных в Табл. 1, построим функции принадлежности для каждого терма. Поскольку нет никаких априорных сведений относительно вида функций принадлежности и малый объем исследуемой выборки, выберем для них самую простую форму – треугольную (Рис.3). Существенным преимуществом треугольных функций принадлежности является то, что для их определения требуется наименьший по сравнению с остальными функциями (например, в виде нормального распределения) объем информации, который в данном случае ограничивается данными об угловых точках, что является весьма важным обстоятельством при моделировании систем в условиях ограниченности объема исходных данных. На Рис.3 представлен вид функции принадлежности лингвистической переменной «Минимум ЭРГ», а ниже приводится ее аналитическая запись.

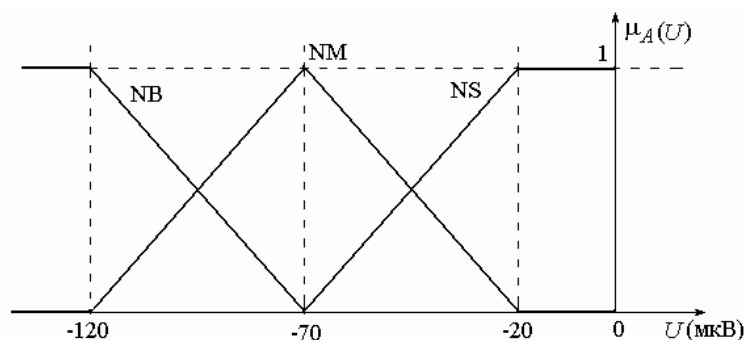


Рис. 3. Функции принадлежности термов лингвистической переменной «Минимум ЭРГ»

Аналитическая форма записи функций принадлежности:

$$NB: \mu_A^{NB}(U) = \begin{cases} 1 & \text{при } U < -120 \\ -0,02U - 1,4 & \text{при } -120 \leq U \leq -70, \\ 0 & \text{при } U > -70 \end{cases}$$

$$NM: \mu_A^{NM}(U) = \begin{cases} 0 & \text{при } U < -120 \\ 0,02U + 2,4 & \text{при } -120 \leq U \leq -70, \\ -0,02U - 0,4 & \text{при } -70 \leq U \leq -20 \\ 0 & \text{при } U > -20 \end{cases}$$

$$NS: \mu_A^{NS}(U) = \begin{cases} 0 & \text{при } U < -70 \\ 0,02U + 1,4 & \text{при } -70 \leq U \leq -20 \\ 1 & \text{при } U > -20 \end{cases}$$

Аналогично строятся остальные функции принадлежности и получаются аналитические формы их записи.

Алгоритм нечеткого логического вывода в данном случае целесообразно строить с использованием реляционных моделей. В нечетких реляционных моделях входные нечеткие переменные отображаются на выходные нечеткие переменные с помощью нечетких соответствий (отношений), определяемых реляционными матрицами. Эти модели позволяют предварительно зафиксировать лингвистические термы входных и выходных нечетких переменных и затем настроить нечеткие отображения, реализуемые моделями, посредством изменения элементов нечетких соответствий.

Определяется **нечеткое соответствие** $\tilde{F} = (X, Y, \tilde{F})$, где X – область отправления (множество типовых ситуаций), Y – область прибытия (множество возможных диагнозов), $\tilde{F}$ – график нечеткого соответствия.

Обобщенная нечеткая ситуация характеризуется нечетким множеством

$\tilde{G} = \{ \langle \mu_G(x_i) \mid x_i \rangle \}, x_i \in X, \tilde{G} \subset X$. Мощность этого нечеткого множества равна произведению количества термов всех лингвистических переменных (в рассматриваемом случае $|\tilde{G}| = 3 \times 2 \times 3 \times 2 = 36$). Элементы множества $\tilde{G}$ представляют собой все возможные сочетания термов:

$$x_1 = \{A = "NB" \& T_a = "S" \& B = "PS" \& T_b = "S"\},$$

$$\mu_G(x_1) = \min(\mu_A^{NB}(U), \mu_{T_a}^S(t), \mu_B^{PS}(U), \mu_{T_b}^S(t));$$

$$x_2 = \{A = "NB" \& T_a = "S" \& B = "PS" \& T_b = "B"\},$$

$$\mu_G(x_2) = \min(\mu_A^{NB}(U), \mu_{T_a}^S(t), \mu_B^{PS}(U), \mu_{T_b}^B(t));$$

.....

$$x_{36} = \{A = "NS" \& T_a = "B" \& B = "PB" \& T_b = "B"\},$$

$$\mu_G(x_{36}) = \min(\mu_A^{NS}(U), \mu_{T_a}^B(t), \mu_B^{PB}(U), \mu_{T_b}^B(t)).$$

Для построения графика нечеткого соответствия $\tilde{F}$ удобно воспользоваться данными, приведенными в Табл. 1, поскольку они характеризуют некоторые типовые ситуации. Нечеткий график нечеткого соответствия $\tilde{F} = \|f_{ij}\|$ строится в виде реляционной матрицы.

Нечеткое множество возможных патологий $\tilde{H} \subset Y$ определяется как композиция входной нечеткой ситуации $\tilde{G}$ и нечеткого графика $\tilde{F}$:

$$\tilde{H} = \tilde{G} \circ \tilde{F}, \quad \mu_H(y_j) = \bigvee_{i=1}^{36} \mu_G(x_i) T f_{ij}. \quad (1)$$

В выражении (1) символами «Т» и «S» обозначены Т- и S-нормы, которые являются нечеткими расширениями операций «И» и «ИЛИ»

соответственно. В большинстве практических приложений используется максиминный логический базис, для которого нечетким расширением «И» является операция взятия минимума, а расширением «ИЛИ» – операция взятия максимума:

$$\begin{aligned} c_1 \text{ T } c_2 &= \min(c_1, c_2), \\ c_1 \text{ S } c_2 &= \max(c_1, c_2). \end{aligned} \quad (2)$$

Работоспособность приведенного алгоритма иллюстрируется проверкой работы данной диагностической системы (назовем ее экспертной системой №1, ЭС 1) путем определения патологий у пациентов с известными диагнозами. В Табл. 2 представлены координаты экстремумов 9 пациентов с известными диагнозами, которые используются для ЭС 1.

В Табл. 3 в первом столбце приведены известные диагнозы 9 пациентов, а в соответствующих строках даются степени соответствия возможных диагнозов, определяемых ЭС 1. Полученные результаты приведены в Табл. 3 (нечеткие множества пронормированы).

В Табл. 3 и последующих таблицах светлая окраска ячейки свидетельствует о совпадении вывода ЭС с известным диагнозом, а штриховка – это неверный результат работы ЭС. Анализ результатов, представленных в Табл. 3, показывает значительное число плохо различимых ситуаций, а порой и неверных результатов. Это, естественно, связано с тем, что показатели характерных точек ЭРГ конкретных пациентов отличаются от усредненных параметров, на основе которых проводилось обучение системы. Большое значение играет так же вид задаваемых функций принадлежности. Кроме этого существенную роль играют условия проведения эксперимента, особенно степень затемнения помещения, в котором проводится запись ЭРГ.

Анализ значительного числа ЭРГ пациентов, полученных в разное время, с разных установок и при разных внешних условиях проведения исследований показывает, что при построении ЭС диагностики в качестве факторов целесообразно брать не сами значения максимумов и минимумов ЭРГ, а их отношения. Например, $\frac{U_a}{U_b}$ или $\frac{U_b - U_a}{U_a}$.

Была построена по представленному выше алгоритму ЭС 2, учитывающая три отличительных признака: $\frac{U_a}{U_b}$, t_a и t_b . Результат работы

Табл. 2. Координаты экстремумов ЭРГ пациентов

Диагностируемые объекты (пациенты)	U_a	U_b	T_a	T_b
N_009L	-98.5	28.5	17,5	39.0
N_008L	-81.0	23.0	19.0	33,5
RD_10R	-53.9	75.5	17,5	45.0
RD_003	-130.7	237	17.0	40.0
SD_002L	-85.6	55.2	19,5	35.0
SD_005L	-114.1	60.8	19.0	40,3
XR_003L	-100.0	12.0	17,5	34,5
XR_006L	-84.0	12.9	18,5	31,5
GL_004R	-8.0	113	22.0	61,8

Табл. 3. Тестовая проверка работы диагностической ЭС 1

Диагностируемые объекты (пациенты)	N	GL	DRP	RD	RP	XR_R	SD
N_009L	0,38	0	0,14	0,34	0,45	0,98	1
N_008L	0,13	0	0	0,18	0,30	1	0,67
RD_10R	0,03	0	0,09	1	0,30	0,50	0,81
RD_003R	0,29	1	0	0	0	0	0
SD_002L	0,56	0	0	0,79	0,45	1	0,79
SD_005L	1	0	0,12	0,36	0,23	0,67	0,91
XR_R003L	0	0	0	0,27	0,45	0,77	1
XR_R006L	0	0	0	0,18	0,30	1	0,67
GL_004R	0	0	1	0	0,17	0	0

такой системы для тех же пациентов представлен в Табл. 4.

Отметим, что ЭС 2, несмотря на то, что при ее построении используется меньшее число признаков, дает меньше ошибок и больше правильных ответов по сравнению с ЭС 1. Характерными особенностями рассмотренных ЭС при работе с конкретными показателями ЭРГ пациентов является то, что плохая различимость тех или иных патологий в большинстве случаев не совпадает между системами. В дальнейшем будет показано, что эти особенности проявляются как для ЭС, построенных для признаков, извлекаемых из динамической модели биоэлектрической активности сетчатки, так и для ЭС со смешанными признаками, извлекаемыми из ЭРГ и динамической модели биоэлектрической активности сетчатки. Таким образом, можно будет, подбирая признаки, строить ЭС для диагностики конкретных патологий.

Табл. 4. Тестовая проверка работы диагностической ЭС 2

Диагностируемые объекты (пациенты)	Нечеткое множество возможных патологий							
	N	GL	DRP	RD	RP	XR	M	SD
N_009L	1	0,16	0,047	0,33	0,24	0,106	0,51	0,55
N_008L	1	0,17	0	0,35	0,25	0,125	0,54	0,59
RD_10R	0,35	0,49	0,49	1	0,30	0	0,85	0,79
RD_003	0,27	0,46	0,25	1	0,30	0	0,85	0,79
SD_002L	1	0,59	0	0,94	0,48	0	0,94	0,91
SD_005L	1	0,49	0,28	0,60	0,32	0	0,69	0,75
XR_003L	0,17	0	0	0	0	1	0	0
XR_006L	0,21	0,19	0	0,28	0,28	1	0,40	0,40
GL_004R	0,046	1	1	0,66	0,94	0	0,40	0,23

Анализ возможностей диагностических ЭС, построенных с использованием нечеткого логического вывода, указывает на ограниченность их возможностей в силу малого числа факторов, извлекаемых из ЭРГ, и зависимости части из них от условий проведения исследований.

2. Извлечение дополнительных признаков для системы диагностики в виде параметров подстраиваемой динамической модели объекта

Рассмотрим построение динамической модели биоэлектрической активности сетчатки с целью получения дополнительных признаков в форме значений ее параметров в зависимости от видов патологий.

На основании общего представления о функционировании компонент сетчатки, вводится эмпирическая 4-х компонентная динамическая модель, параметры которой необходимо подстраивать, сравнивая переходные процессы на выходе модели при имитации подачи светового импульс и исследуемой ЭРГ. Таким образом, предполагается решить задачу разложения реальной ЭРГ на составляющие компоненты с целью диагностики патологий по получаемым параметрам компонентов ЭРГ.

Для моделирования удобно воспользоваться средой Matlab (Simulink) [11], при помощи которой получаем модель в виде параллельного соединения линейных динамических звеньев. Структура такой модели, построенной в среде Simulink, приведена на Рис. 4. Модель разбита

на компоненты, причем номера компонент соответствуют номерам составляющих ЭРГ, приведенных на этом же рисунке. Модель содержит в своем составе апериодические и упругие (интегро-дифференцирующие) звенья. Помимо параллельной структуры, другой важной особенностью данной модели является наличие запаздывания, находящегося в 3-ей компоненте.

Передающая функция объекта представляется в виде [12]

$$W(s) = \frac{Y(s)}{X(s)} = -W_1(s) + W_2(s) - W_3(s) + W_4(s),$$

$$W_1(s) = \frac{K_1(1+sT_3)}{(1+sT_1)(1+sT_2)},$$

$$W_2(s) = \frac{K_2(1+sT_7) \cdot \exp(-s\tau)}{(1+sT_4)(1+sT_5)(1+sT_6)},$$

$$W_3(s) = \frac{K_3}{(1+sT_8)(1+sT_9)},$$

$$W_4(s) = \frac{K_4}{(1+sT_{10})(1+sT_{11})}.$$

где s — оператор дифференцирования.

Имитационная модель составлена так, чтобы можно было описать экстремумы ЭРГ. Модель должна подстраиваться под наблюдаемую ЭРГ. Метод подстройки связан с подгоном значений коэффициентов модели. В качестве критерия используется минимум среднего квадратического отклонения (СКО) между выходным сигналом модели и имеющимися в наличии цифровыми файлами ЭРГ. Но кроме минимума СКО еще необходимо учитывать совпадение экстремумов модели и ЭРГ. В модели 16 пара-

метров, включая запаздывание. Необходимо решить задачу по их подбору.

При моделировании было установлено, что 10 параметров из 16, будучи один раз найденными, остаются практически неизменными при моделировании различных ЭРГ. В основном в подстройке участвует сочетание значений коэффициентов усиления и постоянных времени a - и b -волн (4 и 3 компонента), а также существенный вклад вносит суммарный коэффициент усиления 1 и 2 компоненты. Все это значительно упрощает процесс подстройки модели и дает возможность использования найденных параметров модели в качестве дополнительных 5 признаков для целей диагностики.

При помощи подстраиваемой модели было обработано 180 ЭРГ с известными патологиями. Для всех анализируемых ЭРГ удалось найти соответствующие параметры, минимизирующие СКО между выходом модели и ЭРГ пациента. Полученные результаты соответствуют существующим представлениям о физиологическом функционировании соответствующих компонент. Однако анализ числовых значений 5 названных параметров как дополнительных признаков в зависимости от видов патологий для 180 пациентов показывает их значительный разброс и сильное пересечение. Аналогичные особенности отмечены ранее для параметров двух экстремумов ЭРГ.

3. Двух и трехуровневые системы диагностики с дополнительными признаками в виде параметров подстраиваемой динамической модели

Учитывая опыт работы ЭС 1 и ЭС 2, были построены ЭС диагностики патологий сетчатки глаза на базе нечеткого логического вывода по общей ЭРГ с использованием дополнительных признаков в виде параметров подстраиваемой динамической модели биоэлектрической активности сетчатки. Был проведен широкий комплекс исследований по сравнительному анализу эффективности диагностических ЭС на базе нечеткого логического вывода с использованием только параметров подстраиваемой модели, а так же систем со смешанными параметрами. Кроме этого анализировались системы на

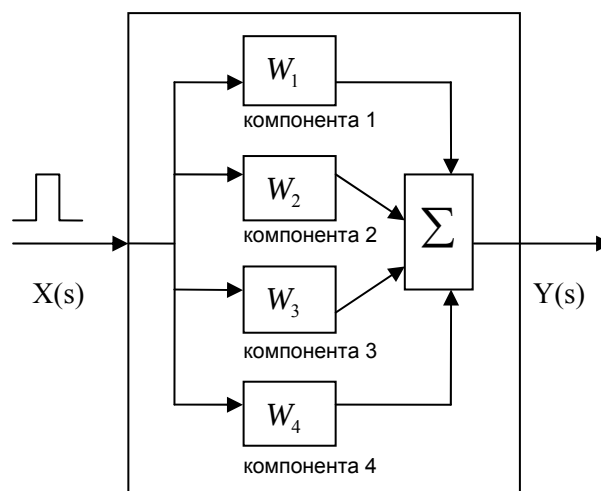


Рис. 4. Схема модели и разложение ЭРГ с выделенными компонентами

разное число параметров – три, четыре и т.д. При этом вид функций принадлежности сохранялся треугольным и количество термов в них не превышало трех.

Проведенные тестовые проверки показывают большое число правильных диагнозов для ряда частных ЭС (будем называть их – «подсистемами»), использующих разные сочетания из девяти признаков по три. Но вместе с тем для этих подсистем характерны и ошибки. Однако примечателен тот факт, что ошибочные результаты, как правило, не совпадают для разных подсистем. Вместе с тем, если сопоставить вместе результаты работы всех рассмотренных подсистем (например, просуммировать соответствующие результаты и произвести нормировку относительно наибольшей суммы), то итоговая таблица работы ансамбля из ряда отобранных для диагностики конкретной патологии (неисправности) подсистем дает достаточно качественные результаты [12]. Эти результаты представлены в Табл. 5.

Отметим, что все диагнозы, кроме одного, в результате совпали с заранее известными. Однако этот результат, по мнению экспертов, нельзя признать неудачным, так как в данном конкретном случае отсложка сетчатки находилась на начальной стадии на фоне миопии.

Таким образом, на примере выборки по представленным выше пациентам показана достаточно успешная возможность использования диагностических ЭС с разным набором признаков. Но если для данной малой выборки пациентов диагностику можно признать успешной, то при диаг-

Табл. 5. Итоговая таблица работы ансамбля диагностических экспертных подсистем по диагностике патологий конкретных пациентов

Диагностируемые объекты (пациенты)	Нечеткое множество возможных патологий									
	N	GI	GL2	GL3	M	XR-R	SD	RD	RP	DRP
N_009L	1	0,34	0,057	0,010	0,54	0,26	0,55	0,44	0,18	0,043
N_008L	1	0,34	0,057	0,010	0,55	0,27	0,56	0,44	0,19	0
RD_10R	0,25	0,70	0,24	0,24	0,46	0,25	0,53	1	0,22	0,31
RD_003R	0,38	0,53	0,15	0,19	1	0,097	0,70	0,72	0,23	0,17
SD_002L	0,64	0,93	0,38	0,48	0,74	0,23	1	0,91	0,35	0,042
SD_005L	0,65	0,64	0,18	0,23	0,60	0,33	1	0,76	0,27	0,20
XR_R003L	0,20	0,20	0,28	0,22	0,017	1	0,23	0,36	0	0
XR_R006L	0,57	0,37	0,10	0,018	0,32	1	0,70	0,72	0,28	0
GL_004R	0,033	1	0,63	0,68	0,31	0	0,33	0,64	0,95	0,46

ностировании остальных пациентов слишком велик процент ошибочных (ложно положительных) результатов. Прежде всего, это связано с пересекающимися интервалами распределения признаков. То есть, не все признаки можно использовать для диагностики конкретных патологий. Поэтому необходимо выявить наилучшие с точки зрения диагностики отдельных патологий сочетания параметров для отбираемых подсистем. Предлагается создавать ансамбли одновременно используемых ЭС, состоящих из комбинаций 3-х признаков, направленных на диагностику отдельных патологий.

Для создания достаточно эффективной рабочей версии ЭС для диагностики заболеваний сетчатки проведен целый комплекс исследований, направленных на выявление связей между показателями ЭРГ и параметрами динамической модели сетчатки, на определение лучших сочетаний базовых признаков при построении экспертных подсистем и определении их количества в создаваемом ансамбле для диагностики конкретных патологий.

При исследовании диапазонов разброса параметров признаков были выявлены признаки, разброс значений параметров которых весьма четко характеризует отдельные патологии. Однако использование таких признаков в общей диагностической ЭС зачастую приводит к ложноположительным оценкам видов других патологий. То есть не любые сочетания признаков (предпосылок) следует использовать в диагностической системе для выявления конкретной

патологии. Поэтому повышение эффективности работы диагностической ЭС предлагается базировать на одновременном использовании групп (ансамблей) более простых подсистем, в каждой из которых используется не более трех признаков, для различения определенных видов патологий.

При разбиении 9 признаков на группы по 3 получаем 84 сочетания признаков для построения соответствующих подсистем. И из этих подсистем формируются группы, наиболее успешно диагностирующие определенные виды патологий. Фактически одновременная работа группы таких подсистем представляется как рассмотрение проблемы одновременно с разным сочетанием признаков (как бы под разными углами зрения). В результате можно увидеть суммарную степень близости к предполагаемому диагнозу. В итоге были сформированы четыре ансамбля подсистем (четыре группы подсистем) диагностирования. В каждом ансамбле по 13-17 подсистем со своими сочетаниями признаков. Подсистемы в эти ансамбли подбирались таким образом, чтобы можно было ставить конкретный диагноз (в некоторых случаях не один) и при этом наличие ложноположительных результатов было бы минимальным. Исследования показывают, что ЭС в виде ансамбля одновременно используемых 17 подсистем, работающих по сочетаниям трех признаков, с уверенностью 0.90 диагностирует три вида патологий. Еще два вида других патологий с уверенностью 0.96 диагностирует ЭС из

8 подсистем и т.д. Одновременная работа всех сформированных ансамблей позволяет эффективно диагностировать пациентов. В Табл. 6 представлен результат диагностики тех же пациентов, что рассматривались ранее, с помощью одновременно работающих 4 ансамблей диагностических подсистем, каждый из которых представляет собой одновременно работающий ансамбль подсистем, ориентированных на диагностику конкретных патологий.

Следует отметить, что патологии примерно 15% пациентов оказываются плохо различимыми. Однако эксперты–физиологи в большинстве таких особых случаев находят этому рациональное объяснение и не относят подобные результаты к неудовлетворительным.

Результат работы общей диагностической ЭС оказывается достаточно эффективным. Такая ЭС представляет собой двухуровневую структуру. На нижнем уровне работают экспертные подсистемы на базе различных сочетаний из трех признаков, при этом часть таких сочетаний предварительно отбраковывается. На втором уровне результаты работы диагностических подсистем нижнего уровня группируются для выявления конкретных видов патологий (неисправностей). В случае необходимости создается третий, верхний уровень, обобщающий результаты работы всех ансамблей подсистем второго уровня и позволяющий наиболее четко оценить наличие конкретной неисправности.

Опытная проверка двухуровневой диагностической ЭС показала высокую ее эффективность. В дальнейшем предполагается проверка ее для проведения диагностики заболеваний сетчатки на ранних стадиях, а также других патологий зрения.

Заключение

По результатам исследования сформулируем предпосылки и методику построения двух или трехуровневой ЭС для диагностики сложного динамического объекта с использованием нечеткого логического вывода и с дополнительными признаками в виде параметров подстраиваемой динамической модели объекта.

Предпосылки:

1. сложный динамический объект параллельно-последовательной структуры;
2. ограниченное число формализованных признаков, извлекаемых из регистрируемых вре-

Табл. 6. Результат диагностики по 4 ансамблям систем

	N	RD	XR	SD	GL	GL2a	GL3a	M
N_009L	1,00	0,38	0,63	0,63	0,23	0,07	0,13	0,59
N_008L	1,00	0,63	0,61	0,58	0,49	0,13	0,36	0,78
RD_10R	0,27	1	0,27	0,57	0,75	0,36	0,64	0,45
RD_003R	0,81	0,99	0,25	0,69	0,94	0,19	0,50	1,00
SD_002L	0,45	0,50	0,66	1	0,24	0,08	0,08	0,52
SD_005L	0,26	0,62	0,40	1	0,25	0,04	0,10	0,44
XR_R003L	0,25	0,27	1	0,49	0,15	0,04	0,08	0,21
XR_R006L	0,26	0,15	1	0,46	0,10	0,04	0,09	0,19
GL_004R	0,00	0,29	0,04	0,03	0,92	0,91	1	0,07

менных зависимостей при тестировании объекта, которые не позволяют однозначно выявлять причины и место неисправности (патологии);

3. большой разброс и пересечение областей локализации признаков для разных видов неисправностей.

Методика построения двух или трехуровневой диагностической системы включает следующие этапы.

1. Изучение особенностей диагностируемого объекта с целью решения вопроса о возможности построения системы диагностики на базе нечеткого логического вывода;

2. Пополнение (в случае необходимости) базы формализованных признаков за счет параметров подстраиваемой имитационной модели диагностируемого объекта;

3. Построение ансамблей диагностических экспертных подсистем нижнего уровня на базе нечеткого логического вывода с ограниченным числом возможных сочетаний признаков. На этом этапе отбраковываются те подсистемы, сочетания признаков которых не удовлетворяют эксперта. Опыт показывает, что подсистемы нижнего уровня для диагностики патологий сетчатки целесообразно строить с использованием не более трех признаков на каждую подсистему. При этом функции принадлежности могут содержать до трех термов треугольной формы;

4. Формирование второго уровня ЭС в виде ансамбля подсистем нижнего уровня, ориентированных на выявление конкретного вида неисправностей (патологий). Результатом работы

каждого из этих ансамблей является дополнительная обработка результатов диагностик специально подобранных подсистем нижнего уровня, входящих в этот ансамбль;

5. На верхнем, третьем уровне ЭС, если это необходимо, производится обработка результатов диагностик ансамблей второго уровня для более качественной постановки диагноза.

В настоящее время проводится комплекс исследований по возможности применения предлагаемой методики для построения ЭС для оценки текущего состояния технических объектов, в частности, для оценки изменения статических характеристик компрессоров КЦ в течение срока их эксплуатации.

Литература

1. Асаи К. Прикладные нечеткие системы: пер. с яп. / Под ред. Т.Тэрано, К. Асаи, М. Сугэно. М.: Мир, 1993. – 368с.
2. Слободчиков К.Ю. Математическое и информационное обеспечение системы управления компрессорного цеха газоперекачивающих агрегатов// Автоматизация в промышленности. ИПУ РАН. 2004. № 7. – С. 38-42.
3. Armington, J. C. The Electroretinogram// Academic Press.- 1974.- New York.
4. Пархоменко П.П., Согомонян Е. С. Основы технической диагностики/Под ред. П. П. Пархоменко.- М.: Энергоиздат, 1981.
5. Тулупьев А. Л. Алгебраические байесовские сети. Логико- вероятностный подход к моделированию баз данных с неопределённостью. Российская академия наук, Санкт - Петербургский институт информатики и автоматизации, Санкт - Петербург, 2000.
6. Еремин Д.М., Гарцев И.Б. Искусственные нейронные сети в интеллектуальных системах управления. — М.: МИРЭА, 2004.
7. Борисов, В.В. Нечеткие модели и сети / В.В. Борисов, В.В. Круглов, А.С. Федулов. — М.: Горячая линия — Телеком, 2007.
8. Баларев Д.А., Вершинин Д.В., Колосов О.С., Зуева М.В., Цапенко И.В. Принципы разработки экспертных систем ранней диагностики патологий сетчатки и зрительного нерва на основе подстраиваемой динамической модели методами искусственного интеллекта. // Труды XVI международной научно-технической конференции «Информационные средства и технологии», В 3 томах. Т.3. — М.: Издательский дом МЭИ, 2008. - С. 44 — 52.
9. Боднер В.А. Системы управления летательными аппаратами. — М.: Машиностроение. 1973.
10. Вагин В.Н., Еремеев А.П., Дзегеленок И.И., Колосов О.С., Фролов А.Б. Становление и развитие научной школы искусственного интеллекта в Московском энергетическом институте. // Программные продукты и системы. — 2010. - №3. — С. 3 — 16.
11. Анисимов Д.Н., Вершинин Д.М., Колосов О.С., Зуева М.В., Цапенко И.В. Построение систем диагностики патологий сетчатки глаза методами искусственного интеллекта с учетом параметров динамической модели сетчатки. // Вестник МЭИ.- 2010. - №4.- С. 26 — 33.
12. Анисимов Д.Н., Колосов О.С., Вершинин Д.В., Зуева М.В., Цапенко И.В. Диагностика динамических объектов методами нечеткой логики с использованием параметров имитационных моделей. // Мехатроника, автоматизация, управление.— 2010. - №10. — С. 45–50
13. Мелихов А.Н., Бернштейн Л.С., Коровин С.Я. Ситуационные советующие системы с нечеткой логикой.— М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1990.

Анисимов Дмитрий Николаевич. Доцент кафедры «Управление и информатика» Национального исследовательского университета МЭИ. Окончил Московский энергетический институт (Технический университет) в 1985 г. Кандидат технических наук, автор 81 печатной работы. Область научных интересов: нечеткие системы управления, идентификация динамических объектов. E-mail: anisimovdn@mpei.ru

Вершинин Дмитрий Викторович. Ассистент кафедры «Управление и информатика» Национального исследовательского университета МЭИ. Окончил Московский энергетический институт (Технический университет) в 2008 году. Автор 12 печатных работ. Область научных интересов: теория автоматического управления, нечеткие алгоритмы управления и диагностики. E-mail: dvershinin@mail.ru

Колосов Олег Сергеевич. Профессор кафедры Управления и информатики Национального исследовательского университета МЭИ. Окончил Московский энергетический институт (Технический университет) в 1965 году. Доктор технических наук, профессор. Автор 123 печатных работ и одной монографии. Область научных интересов: теория автоматического управления, нечеткие алгоритмы управления и диагностики, динамика нелинейных систем.

E-mail: KolosovOS@mpei.ru

Зуева Марина Владимировна. Руководитель лаборатории клинической физиологии зрения им. С.В. Кравкова ФГБУ «МНИИ глазных болезней им. Гельмгольца» Минздравсоцразвития России. Окончила МГУ им. Ломоносова, биологический факультет, кафедра физиологии высшей нервной деятельности в 1973 году. Профессор патофизиологии, доктор биологических наук. Автор свыше 300 печатных работ. Область научных интересов: нейрофизиология, нормальная и патологическая физиология зрения, ранняя и дифференциальная диагностика и патогенез заболеваний сетчатки и зрительного биологические ритмы, старение зрительной системы. E-mail: visionlab@yandex.ru

Цапенко Ирина Владимировна. Старший научный сотрудник ФГБУ «МНИИ глазных болезней им. Гельмгольца» Минздравсоцразвития России. Окончила МГУ им. Ломоносова, биологический факультет, кафедра физиологии высшей нервной деятельности в 1975 году. Кандидат биологических наук. Автор свыше 260 печатных работ. Область научных интересов: нормальная и патологическая физиология зрения, ранняя и дифференциальная диагностика заболеваний сетчатки и зрительного нерва, глио-нейрональные взаимоотношения. E-mail: sunvision@mail.ru