

---

# ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

---

## СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ, УПРАВЛЕНИЕ И ОБРАБОТКА ИНФОРМАЦИИ (05.13.01)

УДК 681.5.015.8

DOI: 10.24160/1993-6982-2021-6-100-107

### Формирование признакового пространства периодических временных зависимостей для систем диагностики состояния динамических объектов на примере сетчатки глаза

Ю.С. Александрова, Д.А. Баларев, О.С. Колосов, А.В. Овивян, О.И. Парфенова

Рассмотрены приемы формирования признакового пространства информативных признаков периодических сигналов, регистрируемых на выходе динамического объекта неизвестной структуры в ответ на воздействие на вход объекта прямоугольных тестирующих сигналов разной частоты. Пространство признаков используется при создании экспертных систем для диагностики текущего состояния работающего динамического объекта. При большом разнообразии возможных развивающихся неисправностей простейшие практические приемы с применением характерных точек изменения наблюдаемых временных зависимостей дают ограниченное число признаков с большими областями взаимных пересечений. Для расширения признакового пространства предложено применение разложения входных и выходных сигналов в ряд Фурье с целью формирования базы дополнительных признаков. Предлагаемые признаки, в зависимости от условий проведения тестирования, характеризуют передающие свойства объекта в частотной области по изменению его амплитудных и фазовых характеристик. Такими условиями являются частота и длительность тестирующих импульсов. Для удобства сравнения характера изменения частотных характеристик объекта используются две специальные методики. Первая позволяет приводить наблюдаемые временные зависимости к единой псевдочастоте подачи тестирующих сигналов. Вторая использует специально формируемые окна для спектрального анализа отдельных фрагментов наблюдаемых временных зависимостей. Показано, что в зависимости от вида анализируемых частотных характеристик полезными могут оказаться приемы их полиномиальной аппроксимации, а также интегральные оценки отдельных областей частотных характеристик. Полиномиальная аппроксимация дает возможность использовать коэффициенты аппроксимирующих полиномов в качестве дополнительных признаков, а интегрирование отдельных характерных областей частотных характеристик — вводить безразмерные относительные показатели, характеризующие степень изменения частотных характеристик в зависимости от условий эксперимента. Рассматриваемые приемы позволяют подбирать дополнительные признаки, которые могут помочь выделять как отдельные группы неисправностей, так и отдельные неисправности в работающих объектах. Результаты исследований проиллюстрированы примерами анализа изменений электроретинограмм, фиксирующих изменение биопотенциала сетчатки глаза в ответ на световые вспышки разной частоты.

*Ключевые слова:* пространство признаков, диагностика, импульс, динамический объект, частотные характеристики.

*Для цитирования:* Александрова Ю.С., Баларев Д.А., Колосов О.С., Овивян А.В., Парфенова О.И. Формирование признакового пространства периодических временных зависимостей для систем диагностики состояния динамических объектов на примере сетчатки глаза // Вестник МЭИ. 2021. № 6. С. 100—107. DOI: 10.24160/1993-6982-2021-6-100-107.

### Setting up the Attribute Space of Periodic Time Dependencies for Dynamic Object Diagnostic Systems (Taking the Eye Retina as an Example)

Yu.S. Aleksandrova, D.A. Balarev, O.S. Kolosov, A.V. Ovivyan, O.I. Parfenova

The technology of testing dynamically and structurally similar aircraft models for flutter in subsonic wind tunnels using information and The article addresses techniques for setting up the attribute space of informative features of periodic signals recorded at the output of a dynamic object with an unknown structure in response to rectangular testing signals of different frequencies applied to the object input. The attribute

space is used in developing expert systems for diagnosing the current state of an operating dynamic object. With a great variety of possible developing faults, the simplest practical techniques involving the use of characteristic points of change in the observed time dependencies yield a limited number of features with large mutual intersection domains. To expand the attribute space, it is proposed to use the expansion of input and output signals into a Fourier series for setting up a base of additional features. The proposed features characterize, depending on the testing conditions, the object's transferring properties in the frequency domain from changes in its amplitude and phase characteristics. The test pulse frequency and duration serve as such conditions. For the convenience of comparing the object's frequency responses variation pattern, two special procedures are used. The first procedure allows the observed time dependencies to be reduced to a single pseudo frequency of the test signals. The second procedure uses specially formed windows for subjecting individual fragments of the observed time dependencies to a spectral analysis. It is shown that, depending on the type of the frequency responses being analyzed, the techniques for their polynomial approximation, as well as integral estimates of frequency response individual domains can be useful. The polynomial approximation makes it possible to use the coefficients of the approximating polynomials as additional features, and the integration of individual characteristic domains of the frequency responses makes it possible to introduce dimensionless relative indicators that characterize the degree of change in the frequency responses depending on the experimental conditions. The considered techniques open the possibility to select additional features that can help distinguish both separate groups of faults and individual faults in operating objects. The study results are illustrated by the examples of analyzing the changes in electroretinograms that record changes in the eye retina biopotential in response to light flashes of different frequencies.

*Key words:* attribute space, diagnostics, pulse, dynamic object, frequency responses.

*For citation:* Aleksandrova Yu.S., Balarev D.A., Kolosov O.S., Ovivyan A.V., Parfenova O.I. Setting up the Attribute Space of Periodic Time Dependencies for Dynamic Object Diagnostic Systems (Taking the Eye Retina as an Example). Bulletin of MPEI. 2021;6:100—107. (in Russian). DOI: 10.24160/1993-6982-2021-6-100-107.

## Введение

Диагностика текущего состояния функционирующего динамического объекта или системы имеет ряд специфических особенностей, которые должны учитывать наличие или отсутствие возможности проведения активного эксперимента с использованием тестирующих сигналов, условия проведения тестирования, информативность фиксируемых реакций объекта на тестовые воздействия, наличие и уровень шумовой составляющей в анализируемых сигналах и т. д. [1, 2]. Проблемы диагностики усугубляются при отсутствии математической модели тестируемого объекта или системы. Особенно это сказывается на тестировании нелинейных систем с изменяющимися динамическими свойствами при воздействии разнообразных неконтролируемых внешних возмущений.

Вопросы диагностики подобных сложных технических объектов до некоторой степени (естественно, с массой определенных оговорок) можно рассматривать как частные, если их сравнивать с задачами диагностики биологических объектов. Столь «смелая» мысль основывается на том, что технический объект — объект рукотворный, и поэтому постоянное совершенствование его структуры и насыщение новыми чувствительными элементами постепенно позволяет комплексно решать и задачи диагностики, и задачи совершенствования сложного технического объекта. Для биологического объекта сделать это удастся далеко не всегда. Именно поэтому позитивные наработки при создании систем диагностики биологических объектов могут оказаться полезными в технике.

Подобные системы, как в медицине, так и в технике, являются системами поддержки принятия решений и базируются на хорошо развитых методах классификации [3 — 5] или, так называемых, мягких вычислениях [6]. В настоящей работе не анализируются вопросы целесообразности применения того или иного метода

классификации при построении системы диагностики состояния конкретного объекта. В ней анализируются приемы преобразования имеющейся информации о реакции тестируемого объекта в виде периодических временных зависимостей в ответ на действие тестирующих прямоугольных импульсов разной частоты с целью получения дополнительных формализованных признаков состояния объекта.

Дополнительные преобразования весьма полезны, если извлекаемые непосредственно из временных зависимостей признаки по каким-то причинам оказываются недостаточно информативны для качественной диагностики состояния объекта, или их просто недостаточно. Фактически речь идет о методе создания искусственных признаков на основании преобразования исходных данных. Это могут быть самые разные приемы [3, 5], применяемые на начальных этапах формирования базы признаков, их очистки, трансформации и последующей редукции размерности пространства признаков. В основу дополнительных преобразований положены разложение периодических сигналов отклика объекта в ряд Фурье, получение амплитудно-частотных (АЧХ) и фазочастотных характеристик (ФЧХ) объекта, характеризующих передающие свойства объекта для конкретных условий тестирования. Поскольку АЧХ и ФЧХ объекта меняются в зависимости от частоты подачи тестирующих импульсов на вход объекта, то изучается процедура приведения этих характеристик к единой псевдочастоте подачи тестирующих импульсов. Это позволяет проследить изменение амплитуд и фаз одноименных гармоник при изменении частоты подачи тестирующих импульсов. Разработанные приемы рассматриваются на примере обработки наблюдаемых периодических временных зависимостей изменения биопотенциала сетчатки глаза (электроретинограмм) в ответ на действие прямоугольных световых тестирующих сигналов разной частоты.

### Ретинографические методы исследования состояния сетчатки глаза

Практика использования электроретинограмм (ЭРГ) при исследовании состояния сетчатки насчитывает уже свыше полувека [7 — 10]. Электроретинограмма — это запись изменения биопотенциала зрительного нерва в ответ на воздействие различных световых раздражителей.

Для снятия ЭРГ используется стационарная промышленная ретинографическая установка. Основу прибора составляет компьютер, генерирующий различные последовательности световых раздражителей на специальном жидкокристаллическом экране. Этот же компьютер через специальное устройство сопряжения воспринимает, оцифровывает и обрабатывает сигнал реакции сетчатки в ответ на световые раздражители. Сигнал реакции, по существу, является изменением биоэлектрического потенциала зрительного нерва, воспринимаемым с помощью трех электродов, один из которых заземляющий, а два других крепятся к определенным точкам лица пациента. В мире не так много производителей ретинографических установок. В настоящей работе использованы записи ЭРГ с установки TOMЕУ EP-1000. Получаемые данные были сопоставлены с данными установки Roland того же производителя. Уровень записываемого сигнала ЭРГ достигает 100 мкВ, а уровень шумовой составляющей не превышает 1 мкВ. Обработка записи шумовой составляющей показала, что ее статистические характеристики соответствуют равномерно распределенному белому шуму.

В качестве раздражителей (стимулов) чаще всего выступают короткие (0,005 с) световые вспышки. Многочисленные исследования физиологов показывают, что длительность реакции сетчатки на одиночный световой импульс в среднем составляет  $0,065 \pm 0,005$  с. Это на порядок больше, чем длительность самого светового импульса. Именно поэтому форма световых импульсов в анализе принята прямоугольной.

Существует много видов ЭРГ. Среди них общая ЭРГ — ответ сетчатки на одиночный световой им-

пульс. На самом деле импульсы идут с частотой 1 Гц, но воспринимаются сетчаткой как одиночные. Важную информацию о состоянии разных клеточных структур сетчатки содержат ритмические электроретинограммы (РЭРГ). Записи РЭРГ проводят для пяти частот стимуляции световыми импульсами (8,3, 10,0, 12,0, 24,0 и 30,0 Гц), соответствующими стандарту Международного общества клинических электрофизиологов зрения (ISCEV) [7, 11 — 13].

Целый ряд различных ЭРГ направлен на выявление специфических особенностей сетчатки. Несмотря на большое разнообразие ЭРГ, число извлекаемых из них признаков невелико и составляет обычно от одного до четырех. При этом погрешность отсчетов сильно зависит от шумовой составляющей в регистрируемом сигнале. Все это приводит к тому, что регистрируемые признаки обладают значительными областями взаимных пересечений для разных патологий, что затрудняет диагностику.

В данной работе в качестве примеров рассмотрены распространенные виды ЭРГ: общая ЭРГ и фотопические РЭРГ. Последние регистрируются не в темном помещении, а в условиях умеренного внешнего освещения. На рис. 1, а представлена идеализированная общая ЭРГ и составляющие ее компоненты, а на рис. 1, б — структура сетчатки в представлении физиологов, формирующая компоненты ЭРГ [7, 8].

Согласно исследованиям физиологов, в формировании общей ЭРГ задействовано большинство клеточных структур сетчатки, однако для диагностики берут только координаты двух экстремумов (минимума и максимума — точки *a* и *b*) в начальной части электроретинограммы (см. рис. 1, а).

В реальных записях ЭРГ точность отсчета времени наступления максимумов зависит от уровня шумовой составляющей, даже если он относительно мал. При этом интервалы изменения значений координат экстремумов в зависимости от патологий относительно невелики. Это является одной из причин того, что числовые значения координат экстремумов, как признаки

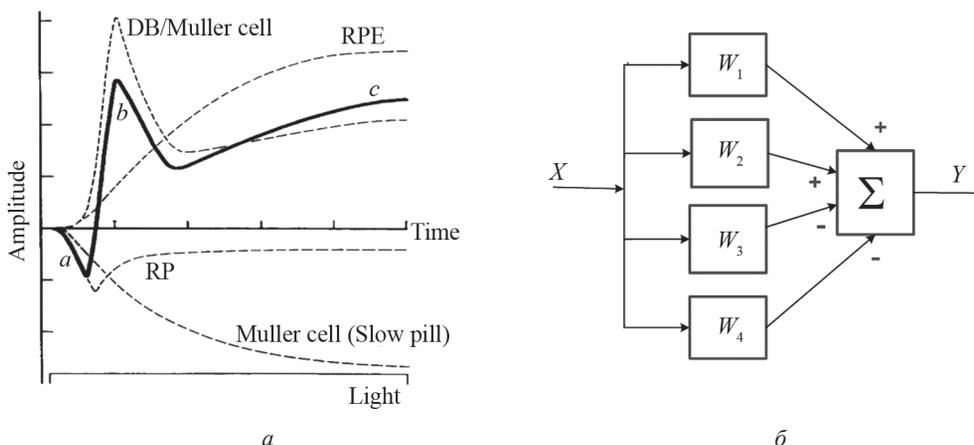


Рис.1. Общая ЭРГ с составляющими ее компонентами (а) и структура сетчатки, формирующая компоненты ЭРГ (б)

патологий, могут быть использованы только с учетом признаков, извлекаемых из других ЭРГ, а также иных знаний о состоянии сетчатки. Из иных ЭРГ число извлекаемых признаков патологий также невелико. Так, из каждой РЭРГ берется только один признак — общее изменение значений РЭРГ от минимума до максимума (общий размах). Значения размаха имеют множество совпадений для разных патологий [6]. В значительной степени это характеризуется четырехкомпонентным структурным представлением сетчатки (см. рис. 1, б). С другой стороны, анализ характера изменения ЭРГ во времени (фрагмент реальной общей ЭРГ на рис. 2, а), показывает, что ЭРГ отличаются друг от друга при разных патологиях характером изменения биопотенциала в промежуточных точках, а не только в точках экстремумов. Поскольку изучаемые ЭРГ — периодические функции, то для поисков дополнительных признаков патологий целесообразно проводить анализ их передающих свойств в частотной области [14].

#### Передающие свойства сетчатки и сопоставление ее частотных характеристик для разных электроретинограмм

Для исследования передающих свойств сетчатки в частотной области выполним расчет амплитудных и фазовых спектров ЭРГ и входного тестирующего сигнала путем представления их в виде ряда Фурье с ограниченным числом гармоник [15,16]:

$$f(t) \approx a_0 + \sum_{n=1}^N (a_n \cos n\omega t + b_n \sin n\omega t), \quad (1)$$

где  $n$  — номер гармоники.

Для построения спектров рассчитаем коэффициенты:

$$a_n = \frac{2}{T} \int_0^T f(t) \cos(n\omega t) dt; \quad b_n = \frac{2}{T} \int_0^T f(t) \sin(n\omega t) dt, \quad (2)$$

где  $\omega = 2\pi/T$ ;  $T$  — период разложения.

Амплитуду  $B_n$  и фазу  $\varphi_n$  соответствующих гармоник ЭРГ определим на основании (2):

$$B_n = \sqrt{a_n^2 + b_n^2}; \quad \varphi_n = -\arctg \frac{b_n}{a_n}. \quad (3)$$

Для прямоугольной формы тестирующего импульса с амплитудой  $A$ , длительностью  $\tau$  и частотой следования  $f = 1/T$  в тестирующей последовательности установим АЧХ и ФЧХ с использованием следующих соотношений:

$$A_n(n\omega) = 2A \frac{\left| \frac{\sin \frac{n\omega\tau}{2}}{2} \right|}{\frac{n\omega T}{2}} = 2A \frac{|\sin(n\pi f 0,005)|}{n\pi}, \quad (4)$$

$$\varphi_n(n\omega) = -\frac{n\omega\tau}{2} = -n\pi f \tau = -0,005n\pi f. \quad (5)$$

АЧХ сетчатки, как исследуемого объекта, получена путем деления амплитуд одноименных гармоник спектра ЭРГ на амплитуды соответствующих гармоник тестирующего импульса (4). Для ФЧХ взята разность фаз соответствующих гармоник ЭРГ (3) и тестирующего импульса (5) [14, 16].

Частоты следования тестирующих импульсов для разных ЭРГ разные, и сопоставить одноименные гармоники в спектрах достаточно трудно, так как число гармоник в них разное и большинство из них не являются одноименными. Для устранения этого недостатка целесообразно свести все ЭРГ к единой псевдо частоте следования импульсов [16], которая должна быть меньше или равна самой малой частоте следования тестирующих импульсов. Соответственно, разложение ЭРГ в ряд Фурье произойдет на самом большом периоде. Несложно доказать на основании (2), (4), что при искусственном удлинении периода амплитуды всех гармоник спектров входного и выходного сигналов пропорционально уменьшаются, но при делении их друг на друга при построении АЧХ положение результирующих одноименных точек на АЧХ не меняется. Важно также, чтобы анализируемая искусственно удлиненная ЭРГ начиналась и заканчивалась нулевыми значениями

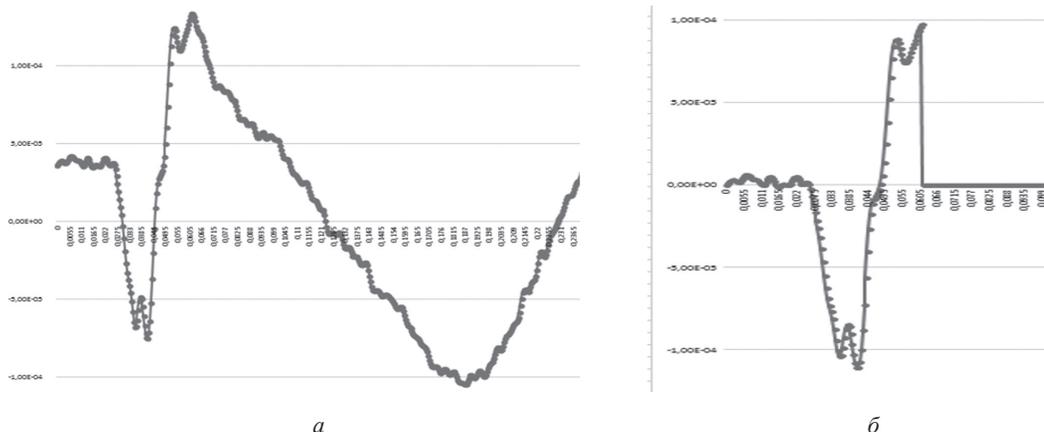


Рис. 2. Виды общей ЭРГ субъекта с нормой зрения (а) и ЭРГ, подвергавшейся обработке (б)

ями, и все дополнительные точки на удлиненной части периода разложения тоже должны быть нулевыми. На рис. 3 изображены АЧХ РЭРГ сетчатки глаза субъекта с нормой зрения, построенные для псевдочастоты 1 Гц. При создании использованы РЭРГ со стандартными частотами следования импульсов 8,3 и 30,0 Гц. В данном подходе истинные значения точек АЧХ (кружки на рис. 3), дополнены промежуточными точками [17], что обеспечивает возможность сравнения АЧХ друг с другом при разных условиях тестирования. Это особенно важно, поскольку при подобном приведении всех ЭРГ к единой псевдочастоте обрабатываются видоизмененные характеристики, что, на наш взгляд, вполне допустимо, т. к. при тестировании не преследуются цели построения адекватной математической модели объекта, а лишь ищутся отличительные признаки, присущие той или иной патологии.

Следует обратить внимание на тот факт, что согласно (4), при длительности прямоугольного импульса 0,005 с гармоники его спектра с номерами, кратными 200, имеют нулевое значение. Соответственно, у АЧХ объекта для этих гармоник смысла нет. Подъем АЧХ в области частоты 200 Гц происходит также из-за шумовой составляющей выходного сигнала при убывании амплитуд гармоник спектра входного сигнала. Именно поэтому на рис. 3 АЧХ ограничена частотой 120 Гц. При частоте следования тестирующих импульсов 30 Гц (см. рис. 3, б) на АЧХ объекта без искусственного удлинения периода есть только 5 точек, что затрудняет проведение сравнительного анализа и говорит о целе-

сообразности приведения всех ЭРГ к единой псевдочастоте.

### Спектральные характеристики фрагментов наблюдаемой общей электроретинограммы

Исследования физиологов [7, 8] показали, что информативными в общей ЭРГ считаются только значения изменения биопотенциала в пределах первых 0,06...0,07 с от начала поступления тестирующего импульса. Это как раз и есть точка положительного экстремума (кульминации). Вся остальная часть ЭРГ очень нестабильна (см. рис. 2, а) и сильно искажает результаты обработки. Природу нестабильной части общей ЭРГ физиологи объясняют по-разному, но для целей диагностики не используют. В силу этого целесообразно всю нестабильную часть ЭРГ заменить нулевыми значениями, как это показано на рис. 2, б, но при этом вести обработку информативной части ЭРГ на полном интервале, соответствующем частоте следования импульсов 1 Гц. В этом случае можно сравнить АЧХ и ФЧХ общей ЭРГ и все пять РЭРГ для стандартных частот следования тестирующих импульсов.

Еще один предварительно выполняемый важный момент — приведение оцифрованной реализации общей ЭРГ к нулевому значению в начальный момент времени. Указанная разница наблюдается, если сравнить начальные участки общей ЭРГ, представленные на рис. 2, а, б. Результат обработки общей ЭРГ субъекта с нормой зрения дан на рис. 4. Можно сравнить

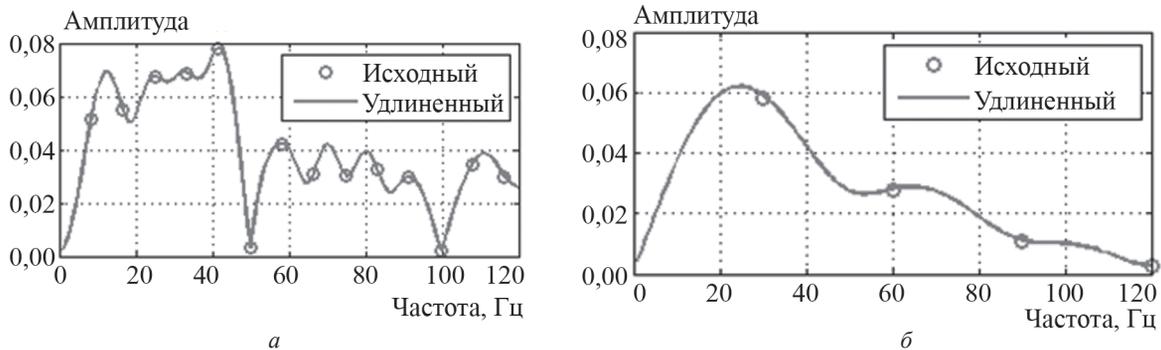


Рис. 3. АЧХ РЭРГ сетчатки глаза субъекта с нормой зрения на псевдочастоте 1 Гц:  
а — частота тестирующих импульсов 8,3 Гц; б — частота тестирующих импульсов 30 Гц

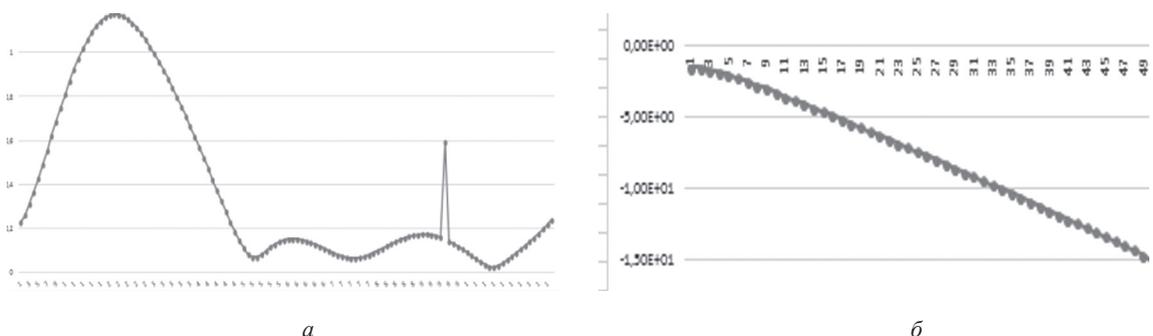


Рис. 4. АЧХ (а) и ФЧХ (б) сетчатки глаза субъекта с нормой зрения

частотные характеристики сетчатки с АЧХ сетчатки этого же субъекта на рис. 3, полученные при обработке РЭРГ.

Обработка по технологии с обнулением неинформативной части имеющихся в базе общих ЭРГ подтверждает выводы физиологов об информативности только части общей ЭРГ, зарегистрированной на интервале времени между нулем и моментом появления положительного экстремума. Фактически оба изученных приема связаны с обнулением сигнала на части обрабатываемого временного интервала. Несложно показать связь такого приема с вейвлет-преобразованием с вейвлетом Хаара [18].

#### **Дополнительные признаки, извлекаемые из частотных характеристик объекта при разных условиях тестирования.**

Описанные приемы приведения к единой псевдочастоте наблюдаемых периодических сигналов в ответ на воздействие прямоугольных тестирующих импульсов разной частоты следования гарантируют проведение сравнительного анализа изменений АЧХ и ФЧХ объекта при разных условиях тестирования. Анализ полученных АЧХ и ФЧХ с учетом особенностей, свойственных диагностируемому объекту, позволяет получить дополнительные признаки состояния диагностируемого объекта. Покажем это на примере АЧХ и ФЧХ сетчатки глаза.

Сравнение результатов обработки общих ЭРГ и РЭРГ малых частот стимуляции (до 12 Гц) одних и тех же субъектов выделяет две специфические области частот на АЧХ с границей в районе гармоник 50 Гц. Составляющие АЧХ низкочастотной части существенно больше составляющих в области высоких частот. ФЧХ всех без исключения ЭРГ хорошо аппроксимируются линейной зависимостью. Всесторонний анализ получаемых частотных характеристик сетчатки позволяет сделать следующие рекомендации по выделению и формированию дополнительных признаков для целей диагностики патологий сетчатки:

- аппроксимация ФЧХ сетчатки (см. рис. 4, б) линейной зависимостью использует в качестве признаков модуль коэффициента наклона характеристики и фазу первой гармоники, являющуюся суммой коэффициентов аппроксимирующего полинома первого порядка, описывающего ФЧХ;

- признаки, извлекаемые из АЧХ, разделяют на абсолютные и относительные:

- абсолютные — признаки, являющиеся коэффициентами аппроксимирующих АЧХ сетчатки полиномов [16];

- абсолютными являются признаки, пропорциональные площадям под участками АЧХ сетчатки на одинаковых отрезках частот в областях низких (НЧ) и высоких (ВЧ) частот;

- в качестве относительного признака целесообразен выбор отношения НЧ/ВЧ.

Все абсолютные признаки имеют общий недостаток: их необходимо соотносить с некоторым обобщенным субъектом с нормой зрения, которого пока нет. Кроме этого вызывает определенные трудности сравнение результатов обработки ЭРГ одних и тех же субъектов на ретинографических установках разных типов.

Относительные признаки, к которым можно отнести отношение НЧ/ВЧ и признаки, извлекаемые из ФЧХ, менее чувствительны к названным затруднениям. Вместе с тем абсолютные признаки, «привязанные» к конкретной установке и условиям проведения эксперимента, вместе с относительными признаками позволяют существенно видоизменить признаковое пространство информативных признаков для диагностики.

Рассмотренные дополнительные признаки состояния сетчатки глаза, извлекаемые из АЧХ и ФЧХ, разумеется, не могут считаться общими для разных объектов. В каждом конкретном случае для конкретного объекта с использованием предлагаемых приемов получают «свои» АЧХ и ФЧХ со своими особенностями. Естественно, что получаемые признаки не совпадают с теми признаками, которые рассматривались для сетчатки.

Вполне очевидно, что вводимые дополнительные признаки должны проверяться на корреляционную связь с уже используемыми признаками, и должна проводиться оценка уровня их значимости на интервалах изменения, но это не предмет настоящей статьи.

#### **Заключение**

Предложены и проанализированы приемы пополнения признакового пространства информативных признаков периодических сигналов. Дополнительные признаки предназначены для использования в системах диагностики развивающихся неисправностей сложных динамических объектов. Результаты исследований проиллюстрированы примерами анализа изменений электроретинограмм, фиксирующих изменение биопотенциала сетчатки глаза с разными патологиями в ответ на световые вспышки разной частоты. Периодические сигналы — ответ объекта на воздействие на входе прямоугольных тестирующих сигналов разной частоты. Для расширения признакового пространства рекомендовано применение разложения входных и выходных сигналов в ряд Фурье с целью формирования базы дополнительных признаков с использованием частотных характеристик сетчатки. Для удобства сравнения характера изменения частотных характеристик объекта использованы две специальные методики (два приема).

Первая приводит наблюдаемые временные зависимости к единой псевдочастоте подачи тестирующих сигналов.

Вторая использует специально формируемые окна для спектрального анализа отдельных фрагментов наблюдаемых временных зависимостей.

Показано, что в зависимости от вида изучаемых периодических зависимостей в диагностике могут быть полезны аппроксимированные фазочастотные характеристики объекта. Помимо них использованы полиномиальная аппроксимация амплитудно-частотных характеристик, а также интегральные оценки отдельных областей этих характеристик. Полиномиальная аппроксимация позволяет применять коэффициенты аппроксимирующих полиномов в качестве дополнительных признаков, а интегрирование отдельных характерных

областей частотных характеристик — вводить безразмерные относительные показатели, учитывающие характер изменения частотных характеристик в зависимости от условий эксперимента.

Рассматриваемые методы в комплексе с уже используемыми признаками помогают более качественно выделять как отдельные группы неисправностей (патологий), так и отдельные неисправности (патологии) в функционирующих объектах с использованием разных методов построения систем диагностики.

### Литература

1. Гинсберг К.С., Басанов Д.М. Идентификация и задачи управления // Идентификация систем и задачи управления: Пленарные доклады IV Междунар. конф. М.: Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, 2005. С. 56—63.
2. Методы классической и современной теории автоматического управления. Т. 2. Статистическая динамика и идентификация систем автоматического управления / под ред. К.А. Пупкова, Н.Д. Егупова. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2004.
3. Hastie T., Tibshirani R., Friedman J. The Elements of Statistical Learning. N.-Y.: Springer, 2001.
4. Айвазян С.А., Бухштабер В.М., Енюков И.С., Мешалкин Л.Д. Прикладная статистика: классификация и снижение размерности. М.: Финансы и статистика, 1989.
5. Дьяконов А.Г. Анализ данных, обучение по прецедентам, логические игры, системы WEKA, RapidMiner и MatLab. М.: Изд-во МГУ им. М.В. Ломоносова, 2010.
6. Anisimov D.N. e. a. Diagnosis of the Current State of Dynamic Objects and Systems with Complex Structures by Fuzzy Logic Using Simulation Models // Sc. and Techn. Information Proc. 2013. V. 40. No. 6. Pp. 365—374.
7. Marmor F. e. a. ISCEV Standard for Full-field Clinical Electroretinography // Doc. Ophthalmol. 2009. V. 118. Pp. 69—77.
8. Stockton R., Slaughter M. B-wave of the Electroretinogram: A Reflection of on Bipolar Cell Activity // J. Gen. Physiol. 1989. V. 93. Pp. 101—122.
9. Falsini B. e. a. The Fundamental and Second Harmonic of the Photopic Flicker Electroretinogram: Temporal Frequency-dependent Abnormalities in Retinitis Pigmentosa // Clin. Neurophysiol. 1999. V. 35. Pp. 4282—4290.
10. Dong C.J., Hare W.A. Contribution to the Kinetics and Amplitude of the Electroretinogram b-wave by Third-order Retinal Neurons in the Rabbit Retina // Vision Research. 2000. V. 40. Pp. 579—589.
11. Hood D.C. e. a. ISCEV Standard for Clinical Multifocal Electroretinography (mfERG) // Doc. Ophthalmol. 2012. V. 124. Pp. 1—13.
12. McCulloch D.L. e. a. ISCEV Standard for Full-field Clinical Electroretinography // Doc. Ophthalmol. 2015. V. 130. Pp. 1—12.

### References

1. Ginsberg K.S., Basanov D.M. Identifikatsiya i Zadachi Upravleniya. Identifikatsiya Sistem i Zadachi Upravleniya: Plenarnye Doklady IV Mezhdunar.Konf. M.: Institut Problem Upravleniya im. V.A. Trapeznikova RAN, 2005:56—63. (in Russian).
2. Metody Klassicheskoy i Sovremennoy Teorii Avtomaticheskogo Upravleniya. T. 2. Statisticheskaya Dinamika i Identifikatsiya Sistem Avtomaticheskogo Upravleniya. Pod Red. K.A. Pupkova, N.D. Egupova. M.: Izd-vo MGTU im. N.E. Baumana, 2004. (in Russian).
3. Hastie T., Tibshirani R., Friedman J. The Elements of Statistical Learning. N.-Y.: Springer, 2001.
4. Ayvazyan S.A., Bukhshtaber V.M., Enyukov I.S., Meshalkin L.D. Prikladnaya Statistika: Klassifikatsiya i Snizhenie Razmernosti. M.: Finansy i Statistika, 1989. (in Russian).
5. D'yakonov A.G. Analiz Dannykh, Obuchenie po Pretsedentam, Logicheskie Igry, Sistemy WEKA, RapidMiner i MatLab. M.: Izd-vo MGU im. M.V. Lomonosova, 2010. (in Russian).
6. Anisimov D.N. e. a. Diagnosis of the Current State of Dynamic Objects and Systems with Complex Structures by Fuzzy Logic Using Simulation Models. Sc. and Techn. Information Proc. 2013;40;6:365—374.
7. Marmor F. e. a. ISCEV Standard for Full-field Clinical Electroretinography. Doc. Ophthalmol. 2009;118:69—77.
8. Stockton R., Slaughter M. B-wave of the Electroretinogram: A Reflection of on Bipolar Cell Activity. J. Gen. Physiol. 1989;93:101—122.
9. Falsini B. e. a. The Fundamental and Second Harmonic of the Photopic Flicker Electroretinogram: Temporal Frequency-dependent Abnormalities in Retinitis Pigmentosa. Clin. Neurophysiol. 1999;35:4282—4290.
10. Dong C.J., Hare W.A. Contribution to the Kinetics and Amplitude of the Electroretinogram b-wave by Third-order Retinal Neurons in the Rabbit Retina. Vision Research. 2000;40:579—589.
11. Hood D.C. e. a. ISCEV Standard for Clinical Multifocal Electroretinography (mfERG). Doc. Ophthalmol. 2012;124:1—13.
12. McCulloch D.L. e. a. ISCEV Standard for Full-field Clinical Electroretinograph. Doc. Ophthalmol. 2015;130:1—12.

13. **Bach M. e. a.** ISCEV Standard for Clinical Pattern Electroretinography (PERG) // Doc. Ophthalmol. 2013. V. 124. Pp. 1—13.

14. **Ягодкина Т.В., Беседин В.М.** Теория автоматического управления. М.: Изд-во Юрайт, 2018.

15. **Анго А.** Математика для электро- и радиоинженеров. М.: Наука, 1967.

16. **Колосов О.С., Короленкова В.А., Пронин А.Д., Титова О.Д.** Преобразование периодических временных зависимостей для расширения признакового пространства в задачах диагностики состояния динамических объектов // Вестник МЭИ. 2020. № 3. С. 81—91.

17. **Сергиенко А.Б.** Цифровая обработка сигналов. СПб. БХВ-Петербург, 2013.

18. **Свиридов В.Г., Свиридов Е.В., Филаретов Г.Ф.** Основы автоматизации теплофизического эксперимента. М.: Издат. дом МЭИ, 2019.

13. **Bach M. e. a.** ISCEV Standard for Clinical Pattern Electroretinography (PERG). Doc. Ophthalmol. 2013;124:1—13.

14. **Yagodkina T.V., Besedin V.M.** Teoriya Avtomaticheskogo Upravleniya. M.: Izd-vo Yurayt, 2018. (in Russian).

15. **Ango A.** Matematika dlya Elektro- i Radioinzhenеров. M.: Nauka, 1967. (in Russian).

16. **Kolosov O.S., Korolenkova V.A., Pronin A.D., Titova O.D.** Preobrazovanie Periodicheskikh Vremennykh Zavisimostey dlya Rasshireniya Priznakovogo Prostranstva v Zadachakh Diagnostiki Sostoyaniya Dinamicheskikh Ob'ektov. Vestnik MEI. 2020;3:81—91. (in Russian).

17. **Sergienko A.B.** Tsifrovaya Obrabotka Signalov. SPb. BKHV-Peterburg, 2013. (in Russian).

18. **Sviridov V.G., Sviridov E.V., Filaretov G.F.** Osnovy Avtomatizatsii Teplofizicheskogo Eksperimenta. M.: Izdat. Dom MEI, 2019. (in Russian).

#### Сведения об авторах:

**Александрова Юлия Сергеевна** — магистр по направлению 27.04.04 «Управление в технических системах» НИУ «МЭИ», e-mail: y.lxndrv@yandex.ru

**Баларев Дмитрий Александрович** — старший преподаватель кафедры управления и интеллектуальных технологий НИУ «МЭИ», e-mail: BalarevDA@mpei.ru

**Колосов Олег Сергеевич** — доктор технических наук, профессор кафедры управления и интеллектуальных технологий НИУ «МЭИ», e-mail: KolosovOS@mpei.ru

**Овивян Анна Вардановна** — студент (магистрант) Института информационных и вычислительных технологий НИУ «МЭИ», e-mail: annaovivyan@mail.ru

**Парфенова Ольга Игоревна** — программист-разработчик научно-исследовательского центра «Автоматизированные системы контроля», Москва, e-mail: Oligha1996@mail.ru

#### Information about authors:

**Aleksandrova Yuliya S.** — Master's Degree in the Direction of 27.04.04 «Management in Technical Systems», NRU MPEI, e-mail: y.lxndrv@yandex.ru

**Balarev Dmitriy A.** — Senior Lecturer of Control and Intelligent Technologies Dept., NRU MPEI, e-mail: BalarevDA@mpei.ru

**Kolosov Oleg S.** — Dr.Sci. (Techn.), Professor of Control and Intelligent Technologies Dept., NRU MPEI, e-mail: KolosovOS@mpei.ru

**Ovivyan Anna V.** — Student (Undergraduate) of Institute of Information and Computing Technologies, NRU MPEI, e-mail: annaovivyan@mail.ru

**Parfenova Olga I.** — Programmer-developer of the Research Center «Automated Control Systems», Moscow, e-mail: Oligha1996@mail.ru

**Работа выполнена при поддержке:** РФФИ (проект № 19-01-00143)

**The work is executed at support:** RFBR (Project No. 19-01-00143)

**Конфликт интересов:** авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов

**Conflict of interests:** the authors declare no conflict of interest

**Статья поступила в редакцию:** 31.03.2021

**The article received to the editor:** 31.03.2021