

---

# ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

---

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

УДК 681.5.015.8

DOI: 10.24160/1993-6982-2020-3-81-91

## **Преобразования периодических временных зависимостей для расширения признакового пространства в задачах диагностики состояния динамического объекта**

О.С. Колосов., В.А. Короленкова, А.Д. Пронин, О.Д. Титова

Проведено целенаправленное преобразование периодических временных зависимостей на примере результатов ретинографических исследований патологий сетчатки глаз с целью изучения их частотных свойств. Данное исследование предназначено для расширения пространства формализованных признаков патологий, которые могут быть использованы в системах диагностики, базирующихся на методах искусственного интеллекта. Разработана методика построения амплитудно-частотных характеристик сетчатки с учетом математического описания импульсных тест-стимулов. Предложена процедура полиномиальной аппроксимации амплитудно-частотных характеристик сетчатки, позволяющая использовать коэффициенты аппроксимирующих полиномов в качестве новых формализованных признаков при диагностике. Показано, что для сложных патологий сетчатки целесообразно учитывать не только амплитудно-частотные характеристики при разных условиях стимулирования, но и фазочастотные характеристики путем анализа годографов сетчатки на комплексной плоскости. При поиске дополнительных формализованных признаков патологий сетчатки следует применять новую обобщенную частотную характеристику годографа сетчатки, облегчающую поиск и формализацию дополнительных признаков патологий.

*Ключевые слова:* периодические сигналы, пространство признаков, системы диагностики, патологии сетчатки глаз.

*Для цитирования:* Колосов О.С., Короленкова В.А., Пронин А.Д., Титова О.Д. Преобразования периодических временных зависимостей для расширения признакового пространства в задачах диагностики состояния динамического объекта // Вестник МЭИ. 2020. № 3. С. 81—91. DOI: 10.24160/1993-6982-2020-3-81-91.

## **Transformations of Periodic Time Dependencies to Expand the Space of Signs in Dynamic Object State Diagnostics**

O.S. Kolosov, V.A. Korolenkova, A.D. Pronin, O.D. Titova

A purposeful transformation of periodic time dependencies as applied to the results from retinographic studies of retinal pathologies was carried out for studying their frequency properties. This study is intended to expand the space of formalized signs of pathologies that can be used in diagnostic systems that are based on artificial intelligence methods. A procedure for constructing the amplitude-frequency responses of the retina taking into account the mathematical description of impulse test stimuli has been developed. A procedure for polynomial

approximation of the retina amplitude-frequency responses has been proposed, which allows the coefficients of approximating polynomials to be used as new formalized signs in diagnostics. It is shown that for complex retinal pathologies it is advisable to take into account not only its amplitude-frequency responses under different stimulation conditions, but also its phase-frequency characteristics by analyzing the retina loci on the complex plane. In searching for additional formalized signs of retinal pathologies, it is recommended to use a new generalized frequency response of the retina loci, which facilitates the search and formalization of additional signs of pathologies.

*Key words:* periodic signals, space of signs, diagnostic systems, retinal pathologies.

*For citation:* Kolosov O.S., Korolenkova V.A., Pronin A.D., Titova O.D. Transformations of Periodic Time Dependencies to Expand the Space of Signs in Dynamic Object State Diagnostics. Bulletin of MPEI. 2020;3:81—91. (in Russian). DOI: 10.24160/1993-6982-2020-3-81-91.

## Введение

Задача формирования признакового пространства возможных состояний функционирующего объекта следует рассматривать гораздо шире, чем решение задач структурной и параметрической идентификации объекта. Задача идентификации объекта, как способ получения его математической модели, при построении систем диагностики, как правило, не ставится, если заранее известно, что временные и материальные затраты на построение адекватной модели неоправданно значительны. Именно по этой причине для создания систем диагностики сложных динамических объектов используют различные методы искусственного интеллекта, базирующиеся на использовании пространства различных признаков состояния объекта. Обычно признаки состояния объекта ищутся путем сравнения определенных временных зависимостей, отражающих реакцию объекта на тестирующие воздействия. В силу большого разнообразия динамических объектов и систем, подвергаемых диагностике, каких-либо единых подходов к поиску формализованных (числовых) признаков не существует. При явном недостатке для диагностики извлекаемых признаков состояния объекта из имеющихся временных зависимостей, дополнительным источником признаков могут служить преобразованные определенным образом исходные зависимости.

В задачах диагностики текущего состояния динамических объектов важная роль отводится анализу периодических временных зависимостей самой различной природы, наблюдаемых на выходе объекта. С одной стороны, это могут быть автоколебания, порождаемые самим объектом (в настоящей работе не рассматривается), а с другой — реакция объекта на периодические внешние раздражители. Обычно раздражители генерируются исследователями или диагностической системой (например, адаптивным регулятором) [1]. Чаще всего в их качестве выступают периодические тестовые сигналы, аддитивно прикладываемые ко входу объекта наряду с основным рабочим воздействием на объект. В адаптивных регуляторах это может быть сумма нескольких гармонических сигналов разной амплитуды и частоты. Сама задача диагностики сложного нелинейного объекта вызвана необходимостью учета изменений его параметров, как под воздействием внешних факторов, так и в процессе эксплуатации. При этом нелинейные свойства объекта могут быть

определены путем изменения параметров тестирующего периодического сигнала [2].

В практике параметрической идентификации динамических объектов накоплен большой опыт решения подобных задач с использованием трех видов тестирующих сигналов: ступенчатого сигнала, гармонических сигналов различной амплитуды и частоты и псевдодвоичных случайных сигналов с заданными статистическими свойствами [3 — 5]. Каждый из упомянутых видов сигналов имеет свои достоинства, недостатки, ограничения и область применения. Для целей диагностики ступенчатый сигнал мало пригоден, так как приводит к смещению рабочей точки объекта в установившемся режиме. Моногармонические тестирующие сигналы затягивают процесс исследований, также как и псевдодвоичные случайные сигналы. Кроме этого, последние сложнее в реализации и обработке результатов.

Для целей диагностики более подходящими являются периодические тестирующие прямоугольные импульсы различной частоты [6]. Такие последовательности имеют достаточно изученные частотные свойства и позволяют уйти от необходимости генерации специальных сумм гармонических тестовых сигналов, сокращают процедуру анализа результатов и относительно просты в технической реализации.

В данной работе обсуждаются характерные рабочие этапы, возникающие при формировании признакового пространства сложного динамического объекта при воздействии на него периодических последовательностей прямоугольных импульсов различной частоты:

- выбор параметров тестирующей последовательности (амплитуда, длительность и частота подаваемых импульсов) с учетом особенностей самого объекта и характеристик аддитивной помехи в наблюдаемом выходном сигнале;
- поиск формализованных (числовых) признаков неисправностей непосредственно из регистрируемого сигнала отклика на выходе объекта;
- обработка регистрируемого сигнала на выходе объекта для расширения признакового пространства путем разложения в ряд Фурье на периоде следования и оценка действительной и мнимой составляющих его гармоник;
- оценка амплитудно- (АЧХ) и фазо-частотных (ФЧХ) характеристик объекта при заданных параметрах тестирующей последовательности импульсов;
- формирование набора АЧХ и ФЧХ тестируемых объектов как нормально функционирующих, так и с известными неисправностями (патологиями);

- поиск формализованных признаков по имеющимся АЧХ и ФЧХ объектов с целью формирования обучающих выборок для систем диагностики, использующих методы искусственного интеллекта.

Рассмотрим последовательно все названные этапы на примере сложного динамического объекта — сетчатки глаза человека.

### Выбор параметров тестирующей последовательности

Создание экспертных систем диагностики на любой основе сопряжено с необходимостью формирования обучающих выборок в виде массивов формализованных признаков тех или иных неисправностей (патологий). Для диагностики патологий сетчатки глаза в медицинской практике используются результаты электроретинографических исследований [7 — 9]. Суть их заключается в анализе зарегистрированных биопотенциалов сетчатки глаза в ответ на определенные световые раздражители. Обработываемые записи изменений носят название электроретинограмм (ЭРГ). Регистрация ЭРГ выполняется на диагностической системе TOMЕУ EP-1000 с соблюдением стандартов международного общества клинических электрофизиологов зрения (ISCEV) [7, 9, 10]. В связи с этим в настоящей работе не затрагиваются вопросы целесообразного выбора вида и параметров тестирующих сигналов. Работа выполнена только с материалами, предоставляемыми операторами диагностической аппаратуры. Тестирующими сигналами (тест-стимулами) служат одиночные световые импульсы. Отклик сетчатки на них — общая электроретинограмма (ОЭРГ). Отклики на последовательность импульсов с определенными стандартными частотами 8,3; 10; 12; 24; и 30 Гц — ритмические ЭРГ (РЭРГ). В свою очередь, РЭРГ бывают фотопическими, регистрируемыми в освещенном помещении (в условиях световой адаптации сетчатки), и скотопическими, регистрируемыми в темном помещении (в условиях темновой адаптации сетчатки). Названные виды входных воздействий (тест-стимулов) и условия их применения выработаны физиологами в процессе изучения строения сетчатки и ее динамических свойств в ответ на действие световых импульсов. Отметим, что параметры периодических импульсных тестируемой последовательности определены соответствующими стандартами [7, 9] на основе исследований физиологов и не наносят никакого вреда пациенту.

На рисунке 1 в общем виде показана форма входных тест-стимулов для регистрации РЭРГ.

Амплитуда импульсов (яркость)  $A$  достаточно комфортна для восприятия сетчаткой глаза и одновременно достаточно велика на фоне регистрируемых аддитивных помех. В тоже время при обработке РЭРГ амплитуда импульсов считается величиной относительной и подбирается с учетом необходимости нормирования получаемых характеристик относительно здоровых

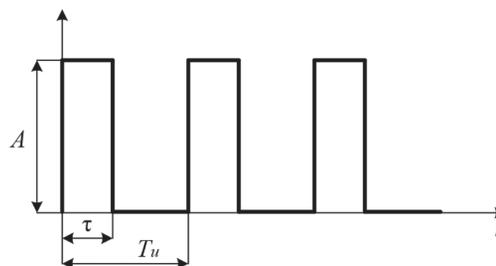


Рис. 1. Форма входных тест-стимулов для регистрации РЭРГ

субъектов. Длительность светового импульса  $\tau$  во всех экспериментах фиксирована и составляет 0,005 с. Период следования импульсов  $T_u$  — величина, обратная одному из значений стандартных частот генерируемых установкой TOMЕУ EP-1000 световых импульсов. Исследования показали, что по отношению к исследуемому объекту световые импульсы с достаточной точностью обладают прямоугольной формой.

### Поиск формализованных признаков патологий при анализе регистрируемого сигнала отклика на выходе объекта

Специалисты для диагностики в качестве формализованных признаков патологий, извлекаемых из ЭРГ, используют координаты экстремумов и различные алгебраические сочетания из координат на этих временных зависимостях [7 — 10]. При анализе РЭРГ также применяется информация об амплитудах первых трех гармоник спектра. Однако количество извлекаемых из каждой ЭРГ формализованных признаков относительно невелико, а значения признаков для разных патологий имеют большие области взаимных пересечений, что затрудняет диагностику. Одними из возможных способов получения новых информативных признаков являются дополнительные математические преобразования регистрируемых ЭРГ. В первую очередь это относится к РЭРГ, как более стабильным зависимостям.

### Обработка ритмических электроретинограмм путем разложения в ряд Фурье на периоде следования

Поскольку анализируемые РЭРГ представляют собой периодические сигналы, то их спектр считается дискретным и представляет собой набор гармонических колебаний, составляющих в сумме исходный сигнал. Несложно убедиться, что сигнал ЭРГ, подвергаемый разложению в ряд Фурье на периоде следования, удовлетворяет условиям Дирихле. Таким образом, периодический сигнал ЭРГ может быть представлен бесконечным тригонометрическим рядом Фурье [11]:

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

где  $a_0$ ,  $a_n$ ,  $b_n$  — коэффициенты ряда, определяемые из соотношений:

$$a_0 = \frac{1}{T} \int_0^T f(t) dt; \quad a_n = \frac{2}{T} \int_0^T f(t) \cos(n\omega t) dt; \quad (2)$$

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

где  $\omega = 2\pi/T$ .

В выражении (1) коэффициент  $a_0$  определяет постоянную составляющую периодического сигнала (2).

Использование усеченного ряда Фурье, содержащего только  $N$  первых членов вместо бесконечной суммы, приводит к приближенному представлению сигнала:

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

Выбор числа  $N$  зависит от уровня шумовой составляющей регистрируемого сигнала ЭРГ и длительности тестирующего импульса.

Знание спектра наблюдаемой РЭРГ в большинстве случаев дает мало информации для диагностики. Одной из причин является, то, что он по существу является преобразованным сетчаткой (объектом) спектром входной тестирующей последовательности. Именно поэтому в анализе необходимо учитывать спектры тестирующих импульсных последовательностей.

Для прямоугольной формы импульсов в тестирующей последовательности их АЧХ (спектр) и ФЧХ имеют вид:

$$A_n(n\omega_u) = 2A \frac{\left| \sin \frac{n\omega_u \tau}{2} \right|}{\frac{n\omega_u T_u}{2}} = 2 \cdot A \frac{\left| \sin(n\pi f_u \tau) \right|}{n\pi}; \quad (3)$$

$$\varphi_n(n\omega) = -\frac{n\omega_u T_u}{2} = -n\pi f_u \tau = -0,005n\pi f_u.$$

На рисунке 2 изображен вид спектров тест-стимулов в соответствии с (4) для частот следования импульсов 10 и 30 Гц с величиной относительной амплитуды  $A = 0,5$ .

Спектры тест-стимулов (4) имеют характерные особенности [12]:

- число гармоник спектра в ограниченном частотном интервале обратно пропорционально частоте следования импульсов, а их амплитуды пропорциональны частоте следования импульсов;
- в спектрах отсутствуют гармоники на частотах, кратных величине  $1/\tau$  (для РЭРГ это частоты 200, 400, 600 Гц и т. д.).

#### Оценка амплитудно- и фазо-частотных характеристик объекта при заданных параметрах тестирующей последовательности импульсов

Для описания свойств динамических объектов в технике широко используется понятие передаточной функции динамического объекта [12]. Она позволяет

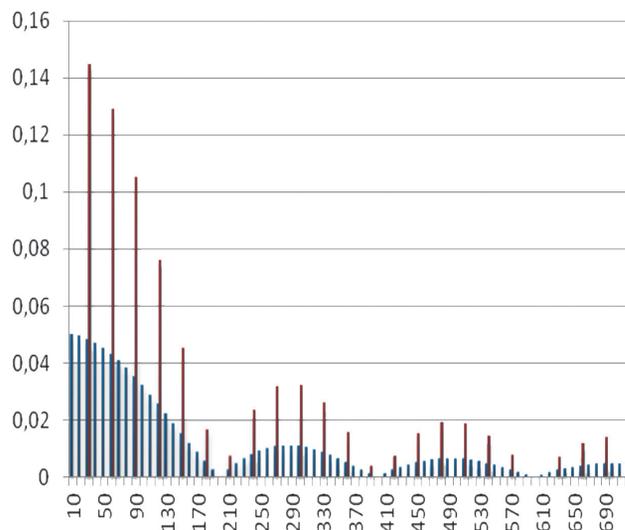


Рис. 2. Вид спектров тест-стимулов для частот следования импульсов 10 (■) и 30 (■) Гц

установить математическую связь между сигналом, поступающим на вход объекта, и наблюдаемым сигналом на его выходе. Это стабильная характеристика для линейного объекта и может быть полностью описана двумя совместно рассматриваемыми характеристиками: АЧХ и ФЧХ. На практике указанные характеристики отражают свойство объекта трансформировать (преобразовывать) спектр входного сигнала в спектр наблюдаемого выходного сигнала. У линейного объекта АЧХ и ФЧХ стабильны и не зависят от вида сигнала, поступающего на его вход. Как правило, АЧХ большинства технических объектов достаточно полно отражает свойства, поскольку между АЧХ и ФЧХ существует взаимно-однозначное соответствие. Подобные объекты называют минимально-фазовыми объектами. Это относится как к линейным, так и к нелинейным объектам, линеаризованным в окрестности рабочего режима.

Наличие в структуре объекта звена запаздывания нарушает взаимно-однозначное соответствие между АЧХ и ФЧХ. То же самое происходит, если в числителе передаточной функции появляются положительные корни. Подобные объекты называют неминимально-фазовыми. Их свойства анализируют либо путем совместного изучения АЧХ и ФЧХ, либо рассматривают амплитудно-фазовую характеристику (АФХ), называемую годографом.

Сетчатка является нелинейным объектом, а для такого случая можно лишь говорить об АЧХ и ФЧХ для конкретных видов входных тестирующих воздействий.

Рассмотрим процесс получения АЧХ сетчатки глаз при воздействии на нее периодических световых импульсов фиксированной длительности со стандартными частотами следования 8,3; 10; 12; 24 и 30 Гц [7, 9]. Выходной сигнал (ответ) сетчатки в условиях предварительной адаптации глаза к постоянному световому фону — фотопическая РЭРГ.

Вид РЭРГ в качестве исходного сигнала, подвергнутого разложению в ряд Фурье на периоде следования импульсов с частотой 10 Гц, продемонстрирован на рис. 3, а. Рассмотрено РЭРГ здорового субъекта с нормальным зрением.

АЧХ сетчатки получается путем деления амплитуд гармоник спектра регистрируемого сигнала РЭРГ на амплитуды гармоник (с соответствующими номерами) спектра тест-стимула [6]. Неизбежные погрешности в расчете точек АЧХ объекта учтены с использованием соответствующих соотношений, приведенных в [6, 13]. Относительные погрешности в оценках точек АЧХ сетчатки для всех частот входных тестирующих последовательностей в рассматриваемых случаях не превышают 1...3%.

Следует отметить, что использование спектров РЭРГ для диагностики осложняется тем фактом, что амплитуды гармоник в них зависят от спектров входных сигналов, в которых, согласно (3), амплитуды одноименных гармоник пропорциональны частоте подаваемых световых импульсов. Построение АЧХ сетчатки путем деления значений амплитуд гармоник спектров РЭРГ, на соответствующие значения амплитуд гармоник входных сигналов, в соответствии с (3), позволяет устранить этот нежелательный эффект [13, 14]. Следует обратить внимание на то, что в исследуемых спектрах допустимая верхняя граница рассматриваемых частот гармоник сужается до 120... 150 Гц из-за влияния спектра шумовой составляющей РЭРГ на вид АЧХ в окрестности критической частоты 200 Гц., где амплитуды гармоник спектра входного импульса близки к нулевым значениям. Это обстоятельство приводит к тому, что количество точек АЧХ для разных частот подачи световых импульсов получается разным и для высоких частот подачи тестирующих импульсов весьма малым. Для частоты подачи импульсов 30 Гц их будет 4...5. Другим фактором, осложняющим поиск дополнительных признаков патологии, является сложность сравнительного анализа изменений амплитуд гармоник для

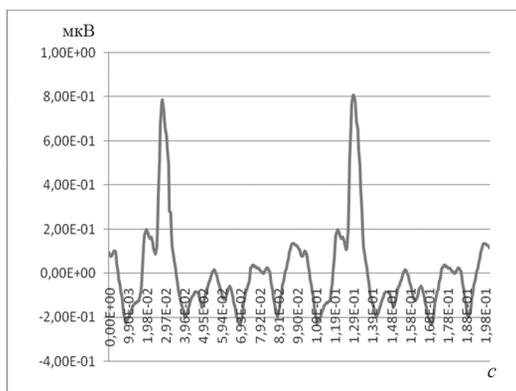
разных частот подачи импульсов, так как число совпадающих гармоник по частоте недостаточное.

### Формирование набора амплитудно-и фазочастотных характеристик тестируемых объектов

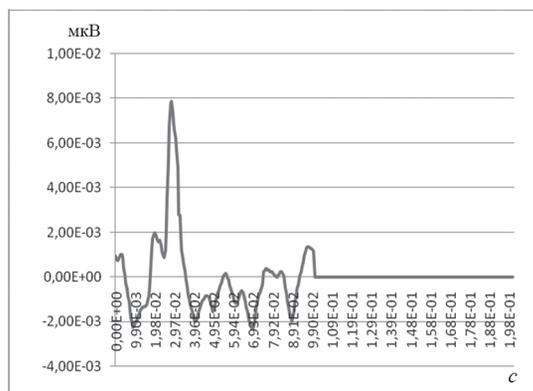
Промежуточные точки АЧХ сетчатки получают искусственным удлинением периода разложения наблюдаемого сигнала (или «окна») нулевыми значениями, которое применяется в радиотехнике для определения промежуточных гармоник исследуемого сигнала [15]. В [15] выполнен спектральный анализ непрерывного сигнала с нулевым математическим ожиданием (для РЭРГ это условие внутри окна обеспечивается наличием фильтра высоких частот регистрирующего прибора).

В нашем случае, условно задерживая приход следующего светового импульса на определенное время, и продлив на это же время нулевыми значениями наблюдаемую РЭРГ, искусственно увеличивается период следования импульсов. При этом получаем промежуточные (дополнительные) точки АЧХ сетчатки [13]. По существу, разрабатываемый подход схож с известным вейвлет-преобразованием, когда используется вейвлет Хаара с той лишь разницей, что в подынтегральном произведении исследуемого сигнала и вейвлета добавляемые нулевые значения принадлежат не вейвлету, а самому исследуемому сигналу [16]. Фактически искусственное удлинение периода следования тестирующих импульсов и одновременное удлинение нулями наблюдаемых РЭРГ ведет к совместному анализу новых сигналов. Легко доказать, используя базовые соотношения (2), что АЧХ объектов при кратных увеличениях периодов сохраняют неизменными значения точек АЧХ объекта при расчетах с использованием исходных временных зависимостей.

Описанный прием позволяет достаточно просто проводить сравнительные исследования изменений АЧХ сетчатки для разных частот следования импульсов. На рисунке 3, б показано удлинение периода об-



а



б

Рис. 3. Вид РЭРГ, подвергнутой разложению в ряд Фурье:

а — исходный сигнал 10 Гц; б — удлинение периода сигнала нулями до частоты 4,15 Гц

работки РЭРГ (сигнал 10 Гц на входе) нулевыми значениями. При этом длительность периода соответствует как бы подаче на вход световых импульсов с псевдочастотой 4,15 Гц.

На рисунке 4 представлены АЧХ сетчатки глаза здорового субъекта с искусственным удлинением периода следования световых импульсов (псевдочастота подачи импульсов 1 Гц). Здесь же помечены точки (○) АЧХ этого же субъекта, полученные в результате обработки исходной РЭРГ, изображенной на рис. 3, а. Заметим, что АЧХ с ростом частоты подачи импульсов постепенно опускаются, то есть, передающие свойства сетчатки ослабевают. С АЧХ здорового субъекта с нормальным зрением можно проводить сравнение АЧХ пациентов с патологией сетчатки. На рисунке 5 даны сравнительные АЧХ двух глаз субъекта с подозрением на глаукому (*GL1*), двух глаз одного субъекта с диагнозом глаукома (*GL2*) и двух глаз здоровых контрольных субъектов (нормы *N1* и *N2*; *N1* включает данные для субъекта с нормальным зрением, *N2* — данные для субъекта с миопией слабой степени). Все АЧХ приведены к псевдочастоте 4,15 Гц. Полученные АЧХ сетчатки отражают свойства преобразования (усиления или ослабления) соответствующих амплитуд гармоник спектра входного сигнала.

Подбор величины амплитуды входного сигнала *A* АЧХ сетчатки конкретного здорового субъекта ограничивается условной единицей или несколько превышает ее (рис. 5).

#### Поиск формализованных признаков по имеющимся амплитудно- и фазо-частотным характеристикам объектов для систем диагностики

Этот этап является наиболее важным и сложным. Следует понимать, что практически невозможно выработать какие-либо общие рекомендации по поиску формализуемых признаков неисправностей объекта (в нашем случае — патологий). Однако для решения поставленной задачи имеются сравнительные анализы семейств АЧХ объекта и АФХ (годографов) объекта. Рассмотрим каждый из них.

#### Аппроксимация амплитудно-частотной характеристики сетчатки с целью получения формализованных признаков для диагностики.

Формализацию признаков, извлекаемых из АЧХ сетчатки, проведем путем аппроксимации алгебраическими степенными полиномами. В качестве аргумента полиномов выступает частота соответствующих гармоник. Коэффициенты могут учитываться в качестве формализованных признаков, характеризующих РЭРГ. Для исследований в этом направлении пригодны известные численные методы, реализуемые в ряде известных математических пакетов. В данном случае взят пакет Mathcad.

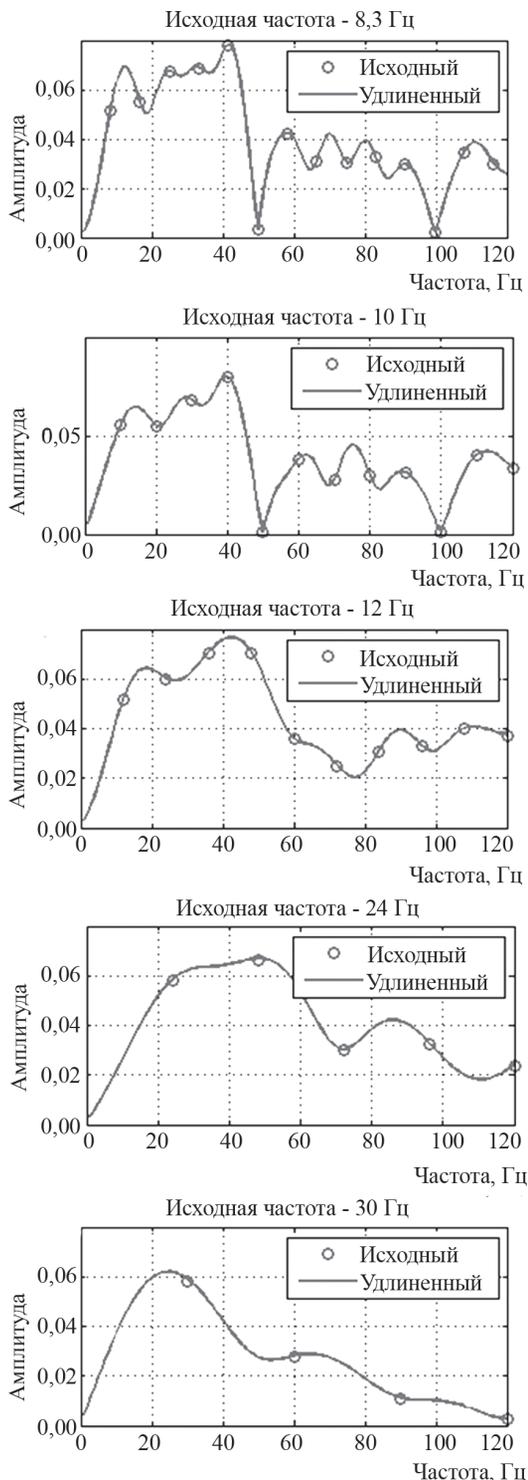


Рис. 4. Семейство АЧХ сетчатки глаза с искусственным удлинением периода следования световых импульсов (псевдочастота подачи импульсов — 1 Гц)

Попытка аппроксимации АЧХ сетчатки одним степенным полиномом на всем диапазоне частот до 120 Гц дает сильно сглаженную кривую вне зависимости от назначаемой степени сглаживающего полинома. Поэтому предложено проводить аппроксимацию АЧХ отдельно для двух диапазонов частот. На участке

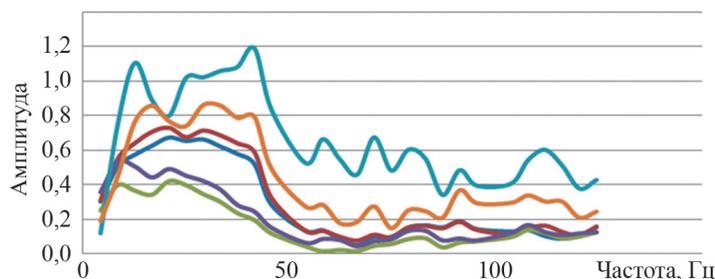


Рис. 5. Семейство АЧХ сетчатки глаз с нормой и глаукомой ( $f = 8,3$  Гц, псевдо частота — 4,15 Гц):

— GL1пр; — GL1лев; — GL2пр; — GL2лев; — N1; — N2

$0 < f < 50$  Гц аппроксимируем АЧХ полиномом второго порядка, а на участке частот  $50 < f < 120$  Гц — полиномом первого порядка. При этом гармонику с частотой 50 Гц пропустим. Таким образом, аппроксимирующую кривую представим в виде:

$$N(f) = \begin{cases} a_0 + a_1 f + a_2 f^2, & \text{если } 0 < f < 50 \text{ Гц;} \\ b_0 + b_2 f, & \text{если } 50 < f < 120 \text{ Гц.} \end{cases}$$

Рассмотрим данную аппроксимацию АЧХ для субъекта с нормальным зрением. На рисунке 6 представлены ее вид при частоте стимуляции 8,3 Гц (псевдо частота — 4,15 Гц), а также результат аппроксимации в виде сглаженных кривых, построенных по найденным зависимостям:

$$N(f) = \begin{cases} 0,13705 + 0,06206 f - 0,00099 f^2, & \text{если } 0 < f < 50 \text{ Гц;} \\ 0,67308 - 0,00189 f, & \text{если } 50 < f < 120 \text{ Гц.} \end{cases}$$

В результате проведенной аппроксимации получим пять числовых значений коэффициентов аппроксимирующих полиномов для каждой частоты стимуляции, которые затем используем в качестве новых дополнительных формализованных признаков для диагностики патологий сетчатки.

Применение получаемых дополнительных признаков по аппроксимированной АЧХ для диагностики разных патологий в ряде случаев дает плохо различимые результаты.

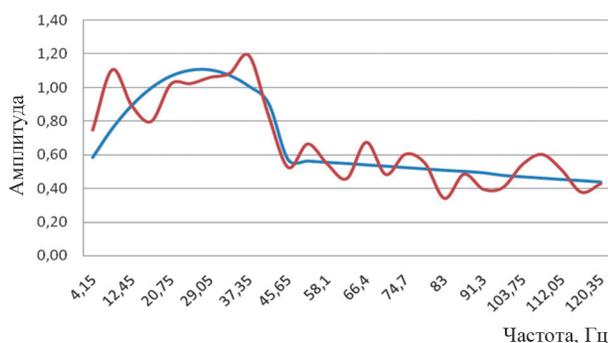


Рис. 6. Совмещенные исходная и сглаженная АЧХ (норма — 8,3 Гц):

— аппроксимация; — норма

### Исследование амплитудно-фазовой характеристики сетчатки.

Учет ФЧХ сетчатки совместно с ее АЧХ демонстрирует возможность получения новых характерных признаков, сопровождающих наиболее опасные патологии, такие как глаукома или диабетическая ретинопатия. Для этих целей можно воспользоваться АФХ (годографом). На рисунке 7 даны годографы сетчатки глаз субъекта с нормальным зрением после обработки РЭРГ с частотой тест-стимула 24 Гц (псевдо частота — 4,15 Гц.) Точками на годографе отмечены положения концов векторов, соответствующих значениям модуля гармоник с номерами от 1 до 30 включительно.

Для визуального восприятия годограф более эффективен по сравнению с АЧХ, но получить с его помощью дополнительные формализованные признаки затруднительно, поскольку для этого необходимо учитывать как амплитуду, так и фазу соответствующих векторов гармоник совместно для разных патологий.

Для облегчения задачи введем обобщенную частотную характеристику годографа. В ее качестве  $W_{GCC}(f_n)$  рассмотрим зависимость от частоты  $f_n$  скалярного произведения действительных и мнимых значений соответствующих точек  $A_n$  годографа с номерами гармоник  $n(1 \leq n \leq N)$ . Иными словами, проанализируем произведение действительных  $A_n \cos \varphi_n$  и мнимых  $A_n \sin \varphi_n$  значений проекций точек годографа в зависимости от частоты либо номера гармоники:

$$W_{GCC}(f_n) = A_n^2 \sin \varphi_n \cos \varphi_n = 0,5 A_n^2 \sin 2\varphi_n, \quad (4)$$

где в соответствии с (1)  $\varphi_n = \arctg \frac{a_n}{b_n}$ .

Смысл введения этой характеристики поясняется примером годографа звена «транспортное запаздывание» с передаточной функцией вида:

$$W(j2\pi f) = e^{-j2\pi f \tau},$$

где  $\tau$  — величина запаздывания.

Годограф такого звена представляет собой непрерывную окружность единичного радиуса на комплексной плоскости, а любая точка на ней характеризуется частотами, кратными  $2\pi$ . Предлагаемая обобщенная частотная характеристика, в соответствии с (4), выглядит как гармоническая зависимость от частоты с фиксированным периодом и амплитудой. Все переходы

зависимости через ноль происходят на частотах, соответствующих переходам годографа из одного квадранта в другой. Один период определяет диапазон частот, обеспечивающих нахождение годографа в двух соседних квадрантах комплексной плоскости.

На рисунке 8 изображены обобщенные частотные характеристики годографов, показанных на рис. 7 для двух глаз субъекта с нормальным зрением на частоте

стимуляции 24 Гц. По оси абсцисс отложены номера гармоник, начиная с первой (псевдочастота — 4,15 Гц). Благодаря такому перестроению годографа удобно выбирать характерные гармоники для сравнения патологий. Так, на рис. 9, а представлены совмещенные обобщенные частотные характеристики годографов для глаз субъектов, а на рис. 9, б — характеристики тех же глаз, но без характеристик глаз с нормой.

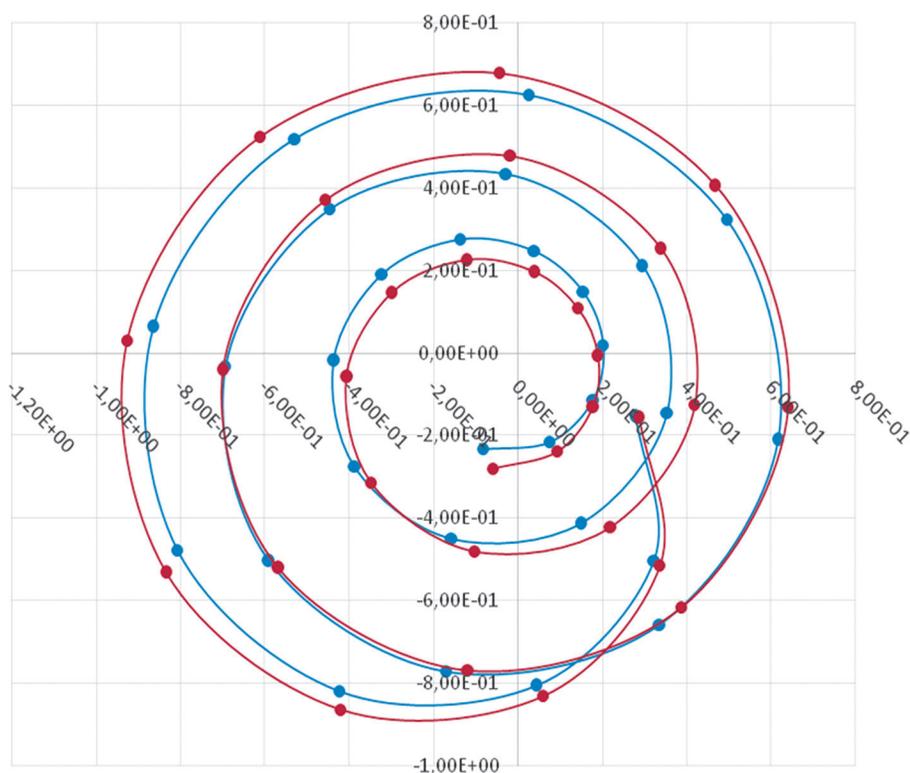


Рис. 7. Годографы правого и левого глаза субъекта с нормой зрения при частоте вспышек 24 Гц:  
● — 24п; ● — 24л

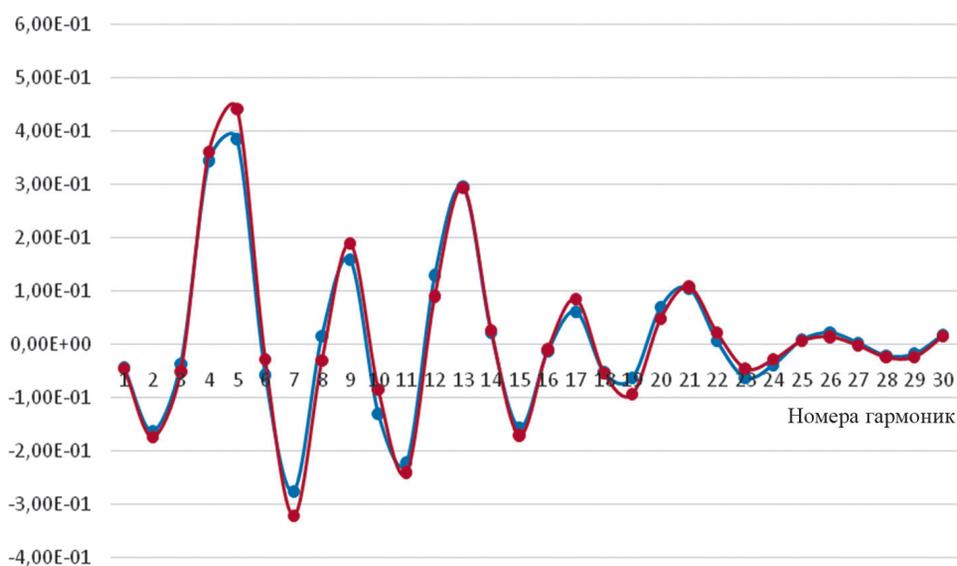


Рис. 8. Обобщенные частотные характеристики годографов (см. рис. 7) для двух глаз субъекта с нормальным зрением на частоте стимуляции 24 Гц:

● — 24п; ● — 24л

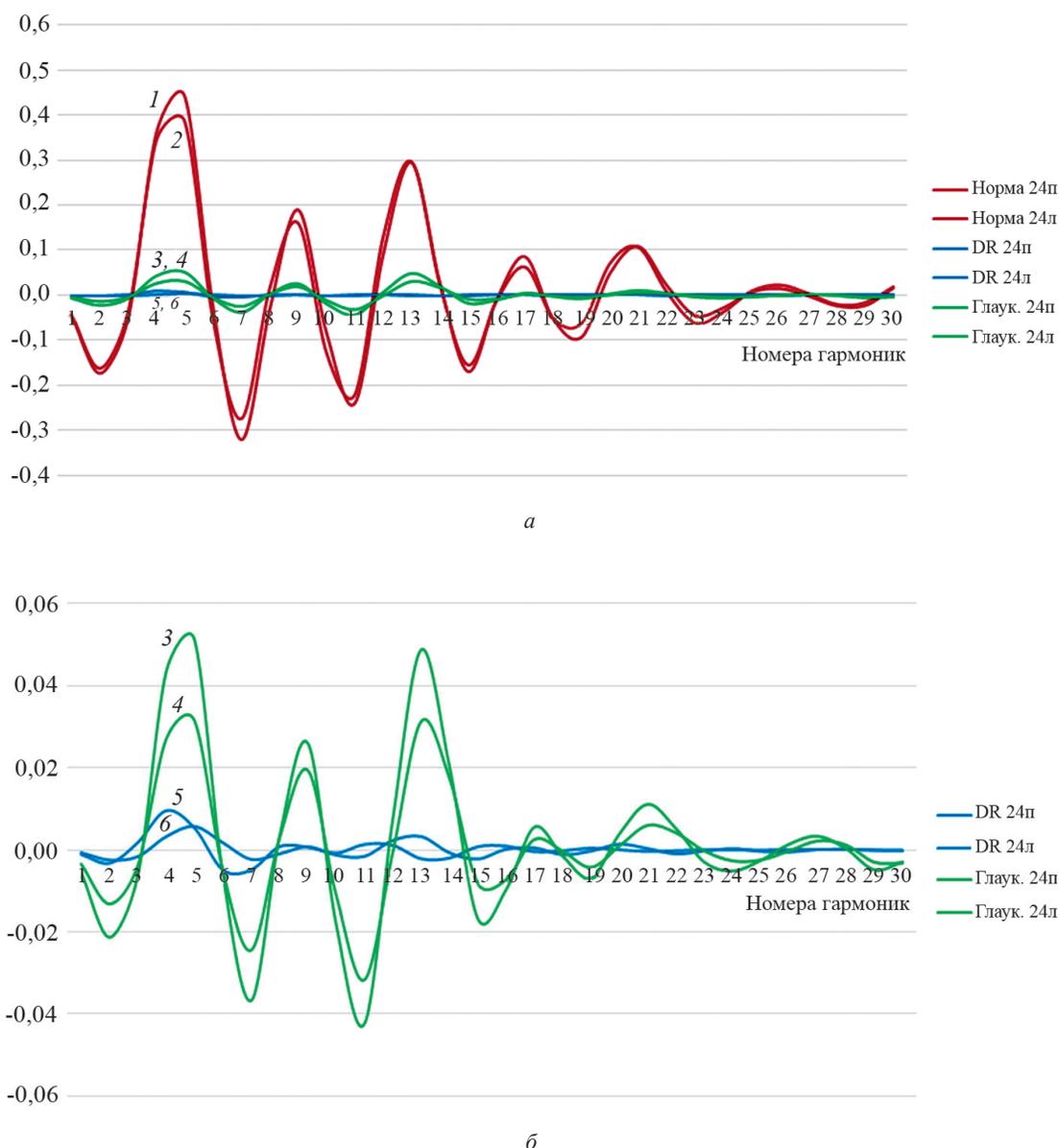


Рис. 9. Совмещенные обобщенные частотные характеристики годографов глаз субъектов: *а* — нормальное зрение (*N* — 1, 2), глаукома (*GL* — 3, 4), диабетическая ретинопатия (*DR* — 5, 6); *б* — глаукома (*GL* — 3, 4), диабетическая ретинопатия (*DR* — 5, 6)

Анализ данных рис. 9 показывает существенное уменьшение амплитуд гармоник для глаз субъектов с патологиями. Кроме этого у субъекта с *DR* наблюдается значительное фазовое отставание частотной характеристики от подобных характеристик других субъектов. Подобные отличия наблюдаются и при других частотах стимулирования. Обработка десятков РЭРГ сетчаток с разными патологиями продемонстрировала их удивительную стабильность для всех стандартных частот подачи тестирующих импульсов. Фактически сетчатка во всех режимах тестирования является звеном чистого запаздывания в пределах 0,01 с.

Выявляемые подобным образом отличия достаточно просто позволяют их формализовать и использовать

в качестве дополнительных признаков в системах диагностики с использованием методов искусственного интеллекта.

### Заключение

Таким образом, показано, что при построении систем диагностики состояний динамических объектов различной природы, базирующихся на методах искусственного интеллекта, целесообразно формировать базу признаков, используя результаты обработки сигналов отклика объекта при тестировании его прямоугольными импульсами различной частоты.

Разработана методика построения и исследования частотных характеристик динамических объектов с

учетом математического описания периодических импульсных тестирующих сигналов и искусственным удлинением их периода, позволяющая расширить области поиска дополнительных информативных признаков развивающихся неисправностей динамических объектов.

Предложена процедура полиномиальной аппроксимации АЧХ, позволяющая использовать коэффициенты аппроксимирующих полиномов в качестве новых формализованных признаков при диагностике.

### Литература

1. **Ротач В.Я.** Теория автоматического управления. М.: Изд-во МЭИ. 2004.
2. **Попов Е.П.** Прикладная теория процессов управления в нелинейных системах. М.: Наука. 1973.
3. **Гинсберг К.С., Басанов Д.М.** Идентификация и задачи управления // Идентификация систем и задачи управления: Пленарные доклады IV Междунар. конф. М.: Ин-т проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН. 2005. С. 56—63.
4. **Rao G. P., Unbehauen H.** Identification of Continuous-time Systems // IEEE Control Theory and Appl. 2006. V. 153. No. 2. Pp. 185—220.
5. **Штейнберг Ш.Е.** Идентификация в системах управления. М.: Энергоатомиздат, 1987.
6. **Колосов О.С., Пронин А.Д.** Особенности идентификации динамических объектов импульсными тестирующими воздействиями // Вестник МЭИ. 2018. № 3. С. 116—125.
7. **McCulloch D.L. e. a.** ISCEV Standard for Full-field Clinical Electroretinography // Doc. Ophthalmol. 2015. V. 130. Pp. 1—12.
8. **Hood D.C. e. a.** ISCEV Standard for Clinical Multifocal Electroretinography (mfERG) // Doc. Ophthalmol. 2012. V. 124. Pp. 1—13.
9. **Bach M. e. a.** ISCEV Standard for Clinical Pattern Electroretinography // Doc. Ophthalmol. 2013. V. 124. Pp. 1—13.
10. **Zueva M.V. e. a.** Assessment of the Amplitude-frequency Characteristics of the Retina with Its Stimulation by Flicker and Chess Pattern-Reversed Incentives and their Use to Obtain New Formalized Signs of Retinal Pathologies // Biomedical J. Sci. & Techn. Research. 2019. V. 19. No. 5. Pp. 14575—14583.
11. **Анго А.** Математика для электро- и радиоинженеров (с предисловием Луи де Бройля). М.: Наука, 1967.
12. **Теория** автоматического управления / под ред. А.В. Нетушила. М.: Высшая школа, 1976.
13. **Колосов О.С., Баларев Д.А., Пронин А.Д., Зуева М.В., Цапенко И.В.** Оценка частотных свойств динамического объекта с использованием импульсных тестирующих сигналов // Мехатроника, автоматизация, управление. 2017. № 18 (4). С. 219—226.

На примере сетчатки глаза доказано, что для сложных патологий целесообразно учитывать не только амплитудно-частотные свойства ее при разных условиях стимуляции, но и фазо-частотные характеристики путем анализа годографов сетчатки на комплексной плоскости.

При поиске дополнительных формализованных признаков патологий рекомендовано использовать новую обобщенную частотную характеристику годографа, облегчающую поиск и формализацию дополнительных признаков неисправностей (патологий).

### References

1. **Rotach V.Ya.** Teoriya Avtomaticheskogo Upravleniya. M.: Izd-vo MEI. 2004. (in Russian).
2. **Popov E.P.** Prikladnaya Teoriya Protseesov Upravleniya v Nelineynykh Sistemakh. M.: Nauka. 1973. (in Russian).
3. **Ginsberg K.S., Basanov D.M.** Identifikatsiya i Zadachi Upravleniya. Identifikatsiya Sistem i Zadachi Upravleniya: Plenarnye Doklady IV Mezhdunar. Konf. M.: In-t Problem Upravleniya im. V.A. Trapeznikova RAN. 2005:56—63. (in Russian).
4. **Rao G. P., Unbehauen H.** Identification of Continuous-time Systems. IEEE Control Theory and Appl. 2006;153;2:185—220.
5. **Shteynberg Sh.E.** Identifikatsiya v Sistemakh Upravleniya. M.: Energoatomizdat, 1987. (in Russian).
6. **Kolosov O.S., Pronin A.D.** Osobennosti Identifikatsii Dinamicheskikh Ob'ektov Impul'snymi Testiruyushchimi Vozdeystviyami. Vestnik MEI. 2018;3:116—125. (in Russian).
7. **McCulloch D.L. e. a.** ISCEV Standard for Full-field Clinical Electroretinography. Doc. Ophthalmol. 2015;130: 1—12.
8. **Hood D.C. e. a.** ISCEV Standard for Clinical Multifocal Electroretinography (mfERG). Doc. Ophthalmol. 2012;124:1—13.
9. **Bach M. e. a.** ISCEV Standard for Clinical Pattern Electroretinography. Doc. Ophthalmol. 2013;124: 1—13.
10. **Zueva M.V. e. a.** Assessment of the Amplitude-frequency Characteristics of the Retina with Its Stimulation by Flicker and Chess Pattern-Reversed Incentives and their Use to Obtain New Formalized Signs of Retinal Pathologies. Biomedical J. Sci. & Techn. Research. 2019;19;5: 14575—14583.
11. **Ango A.** Matematika dlya Elektro- i Radioinzhenerov (s predisloviem Lui de Broylia). M.: Nauka, 1967. (in Russian).
12. **Teoriya** Avtomaticheskogo Upravleniya / Pod Red. A.V. Netushila. M.: Vysshaya Shkola, 1976. (in Russian).
13. **Kolosov O.S., Balarev D.A., Pronin A.D., Zueva M.V., Tsapenko I.V.** Otsenka Chastotnykh Svoystv Dinamicheskogo Ob'ekta s Ispol'zovaniem Impul'snykh Testiruyushchikh Signalov. Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie. 2017;18 (4):219—226. (in Russian).

14. Колосов О.С., Короленкова В.А., Пронин А.Д., Зуева М.В., Цапенко И.В. Построение амплитудно-частотных характеристик сетчатки глаза и формализация их параметров для использования в системах диагностики // Мехатроника, автоматизация, управление. 2018. № 19 (7). С. 451—457.

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

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

14. Kolosov O.S., Korolenkova V.A., Pronin A.D., Zueva M.V., Tsapenko I.V. Postroenie Amplitudno-chastotnykh Kharakteristik Setchatki Glaza i formalizatsiya Ikh Parametrov dlya Ispol'zovaniya v Sistemakh Diagnostiki. Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie. 2018;19 (7): 451—457. (in Russian).

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

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

#### Сведения об авторах:

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

**Короленкова Варвара Алексеевна** — аспирантка кафедры управления и интеллектуальных технологий НИУ «МЭИ»

**Пронин Алексей Дмитриевич** — инженер ООО «ААМ автоматик»

**Титова Ольга Дмитриевна** — аспирантка кафедры управления и интеллектуальных технологий НИУ «МЭИ»

#### Information about authors:

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

**Korolenkova Varvara A.** — Ph.D-student of Control and Intelligent Technologies Dept., NRU MPEI

**Pronin Aleksey D.** — Engineer of LLC «ААМ Автоматик»

**Titova Olga D.** — Ph.D-student of Control and Intelligent Technologies Dept., NRU MPEI

**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:** 06.11.2019

**The article received to the editor:** 06.11.2019