

15. Шаппелл, Д. ESB – Сервисная шина предприятия [Текст] / Д. Шаппелл; пер. с англ. – СПб. : БХВ-Петербург, 2008. – 368 с.
16. Когаловский, М. Р. Перспективные технологии информационных систем [Текст] / М. Р. Когаловский. – Москва ИТ-Экономика, 2003. – 288 с.
17. Хоп, Г. Шаблоны интеграции корпоративны приложений [Текст] / Г. Хоп; пер. с англ. – М. : ООО "И.Д. Вильямс", 2007. – 672 с.
18. Hohpe, B. Woolf. Enterprise Integration Patterns: Designing, Building, and Deploying Messaging Solutions [Text] / B. Hohpe. – Addison-Wesley, 2004.
19. Liyang, Yu. A Developer's Guide to the Semantic Web [Text] / Yu. Liyang. – Springer; 2nd ed. 2014 edition, 2014. – 829 p. doi: 10.1007/978-3-662-43796-4
20. Botzenhardt, A. Developing a Domain Ontology for Software Product Management. Proceedings of the 5th International Workshop on Software Product Management (IWSPM-2011) [Text] / A. Botzenhardt, A. Maedche, J. Wiesner // Fifth International Workshop on Software Product Management (IWSPM), 2011. – P. 7–16. doi: 10.1109/iwspm.2011.6046207
21. Maedche, A. Proc. 6th European PKDD Conf. LNCS V. 2431 [Text] / A. Maedche, V. Zacharias. – Berlin:Springer, 2002. – 348 p.

Запропоновано новий метод побудови непараметричної динамічної моделі око-рухового апарату людини з урахуванням його інерційних і нелінійних властивостей на основі даних експерименту «вхід-вихід». Отримала подальший розвиток технологія відстеження поведінки зіниці за допомогою відеореєстрації, що дозволило визначати динамічні характеристики ока за даними спостережень «вхід-вихід». На основі експериментальних даних із застосуванням ефективних обчислювальних алгоритмів і програмних засобів обробки даних отримана непараметрична динамічна модель системи руху ока людини

Ключові слова: око-руховий апарат, моделювання, непараметричні динамічні моделі, ядра Вольтерра, багатовимірні перехідні характеристики

Предложен новый метод построения непараметрической динамической модели глаза-двигательного аппарата человека с учётом его инерционных и нелинейных свойств на основе данных эксперимента «вход-выход». Получила дальнейшее развитие технология отслеживания поведения зрачка при помощи видеорегистрации, что позволило определять динамические характеристики глаза по данным наблюдений «вход-выход». На основе экспериментальных данных с применением эффективных вычислительных алгоритмов и программных средств обработки данных получена непараметрическая динамическая модель системы движения глаза человека

Ключевые слова: глазо-двигательный аппарат, моделирование, непараметрические динамические модели, ядра Вольтерра, многомерные переходные характеристики

УДК 004.942

DOI: 10.15587/1729-4061.2015.41448

МЕТОД И ИНФОРМАЦИОННАЯ ТЕХНОЛОГИЯ ПОСТРОЕНИЯ НЕПАРАМЕТРИЧЕСКОЙ ДИНАМИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ГЛАЗО- ДВИГАТЕЛЬНОГО АППАРАТА

А. А. Фомин

Кандидат технических наук, доцент*

E-mail: aleksandr.fomin@gmail.com

М. М. Масри

Аспирант*

E-mail: mohannad_massri@live.com

В. Д. Павленко

Доктор технических наук, профессор*

E-mail: pavlenko_vitalij@mail.ru

А. Н. Федорова*

E-mail: camomile763@gmail.com

*Кафедра компьютеризированных

систем управления

Одесский национальный

политехнический университет

пр. Шевченко, 1, г. Одесса, Украина, 65044

1. Введение

Технологии управления на основе отслеживания траектории движения глаза (eye-tracking) начинают получать всё большее распространение [1, 2]. Тра-

диционные сферы внедрения таких решений – это медицинская (офтальмологическая) диагностика и коррекция зрения [3, 4], построение интерфейсов в информационных системах, управление сложными техническими объектами, процесс физической трени-

ровки в спорте и т. д. Повышенный интерес к подобным инновационным технологиям испытывает сегодня и коммерческий сектор.

Однако, большинство систем на основе технологии eye-tracking, для успешного функционирования требуют новых методов математического описания глазо-двигательного аппарата (ГДА) человека и специального оборудования для экспериментальных исследований [5–7].

Для успешного решения задач управления, контроля и диагностики в технических и медицинских приложениях необходимо располагать эффективными методами идентификации ГДА человека. Не имея адекватной математической модели ГДА, учитывающей индивидуальные свойства человека, невозможно создавать современные приложения с расширенным набором персонализированных возможностей, например, медицинские и спортивные тренажёры, авторизованный доступ к данным, тестирование человеко-машинных систем и пр.

2. Анализ литературных данных и постановка проблемы

В работе рассматривается традиционный подход отслеживания углов поворота зрачка глаза (по горизонтали и вертикали) с помощью видео регистрации. Это предполагает использование видеокамеры для получения изображений зрачка в динамике через равные промежутки времени, которая бы чётко фиксировала положение зрачка глаза при его движении [1].

Путём цифровой обработки и анализа последовательности кадров статических изображений и распознавания положения зрачка восстанавливаются координаты положения зрачка на плоскости, а именно, значения горизонтального и вертикального углов поворота глаза относительно начального положения [2].

Значительным недостатком существующих аппаратных средств, реализующих эту технологию, является принципиальная невозможность измерения динамических и нелинейных характеристик ГДА – перспективное направление развития моделирования биологических объектов – без знания которых невозможно построение эффективной системы управления.

Для устранения такого недостатка традиционная структура системы отслеживания поведения зрачка при помощи видео регистрации в данной работе получила дальнейшее развитие, что позволило выполнять не только статические измерения положения зрачка глаза, но и определять динамические характеристики зрительного аппарата человека по экспериментальным данным наблюдений «вход-выход» (задача идентификации) [8, 9].

Эффективность использования современных методов идентификации, в значительной степени зависит от адекватности применяемых математических моделей реальным объектам. В качестве информационной модели объектов живой природы, рассматриваемых как «чёрный ящик», используются интегральные ряды Вольтерра [10, 11], которые в компактной форме характеризуют нелинейные и инерционные свойства исследуемого объекта.

3. Цель и задачи исследования

Целью работы является разработка метода построения непараметрической динамической модели глазо-двигательного аппарата с учётом его инерционных и нелинейных свойств на основе данных экспериментальных исследований «вход–выход», а также инструментальных вычислительных и программных средств информационной технологии обработки данных эксперимента.

Для достижения поставленной цели были поставлены следующие задачи:

- разработка метода построения нелинейной динамической модели ГДА в виде ядер Вольтерра, характеризующих одновременно нелинейные и инерционные свойства объектов живой природы;
- разработка информационной технологии получения экспериментальных данных для идентификации ГДА на основе отслеживания перемещения зрачка при помощи видео регистрации;
- разработка вычислительного метода идентификации многомерных динамических (переходных) характеристик ГДА с помощью тестовых воздействий в виде функций Хевисайда разной амплитуды;
- верификация построенной модели ГДА.

4. Непараметрические динамические модели на основе рядов Вольтерра

Основой для создания математической (информационной) модели исследуемого объекта служат результаты измерений его входных и выходных переменных, и решение задачи идентификации связано с получением экспериментальных данных и их обработкой с учетом шумов измерений.

Для описания объектов неизвестной структуры целесообразно использовать наиболее универсальные нелинейные непараметрические динамические модели – модели Вольтерра [10, 11]. При этом нелинейные и динамические свойства исследуемого объекта однозначно описываются последовательностью инвариантных относительно вида входного сигнала многомерных весовых функций – ядер Вольтерра (ЯВ).

Для непрерывной нелинейной динамической системы (НДС) связь между входным $x(t)$ и выходным $y(t)$ сигналами при нулевых начальных условиях может быть представлена рядом Вольтерра

$$y(t) = \sum_{n=1}^{\infty} y_n(t) = \int_0^t w_1(\tau) x(t-\tau) d\tau + \int_0^t \int_0^t w_2(\tau_1, \tau_2) x(t-\tau_1) x(t-\tau_2) d\tau_1 d\tau_2 + \int_0^t \int_0^t \int_0^t w_3(\tau_1, \tau_2, \tau_3) x(t-\tau_1) x(t-\tau_2) x(t-\tau_3) d\tau_1 d\tau_2 d\tau_3 + \dots, \quad (1)$$

где $w_n(\tau_1, \dots, \tau_n)$ – ЯВ n -го порядка, функция симметричная относительно вещественных переменных τ_1, \dots, τ_n ; $y_n(t)$ – n -ая парциальная составляющая отклика НДС (n -мерный интеграл свертки); t – текущее время.

Для описания НДС со многими входами и многими выходами используется многомерный ряд Вольтерра [8], который имеет вид:

$$\begin{aligned}
 y_j(t) = & \sum_{i_1=1}^v \int_0^t w_{i_1}^j(\tau) x_{i_1}(t-\tau) d\tau + \\
 & + \sum_{i_1=1}^v \sum_{i_2=1}^v \int_0^t \int_0^t w_{i_1 i_2}^j(\tau_1, \tau_2) x_{i_1}(t-\tau_1) x_{i_2}(t-\tau_2) d\tau_1 d\tau_2 + \\
 & + \sum_{i_1=1}^v \sum_{i_2=1}^v \sum_{i_3=1}^v \int_0^t \int_0^t \int_0^t w_{i_1 i_2 i_3}^j(\tau_1, \tau_2, \tau_3) x_{i_1}(t-\tau_1) \times \\
 & \times x_{i_2}(t-\tau_2) x_{i_3}(t-\tau_3) d\tau_1 d\tau_2 d\tau_3 + \dots,
 \end{aligned} \tag{2}$$

где $y_j(t)$ – отклик ОК на j -ом выходе в текущий момент времени t при нулевых начальных условиях; $x_1(t), \dots, x_v(t)$ – входные сигналы; w_{i_1, i_2, \dots, i_n} – ЯВ n -го порядка по i_1, \dots, i_n входам и j -му выходу, функции симметричные относительно вещественных переменных τ_1, \dots, τ_n ; v, μ – количество входов и выходов ОК, соответственно.

В контексте поставленной выше задачи – идентификации ГДА – необходимо использовать модель (2) для математического описания исследуемого объекта: две пары прямых мышц (входы объекта) обеспечивают движения глаза вверх-вниз, вправо-влево, а также различные их комбинации (рис. 1); измеряются отклики – координаты $u(t)$ и $v(t)$ текущего положения зрачка глаза относительно начального положения u_0 и v_0 (выходы объекта). При этом в модели (2) принимается $v=2$ и $\mu=2$.

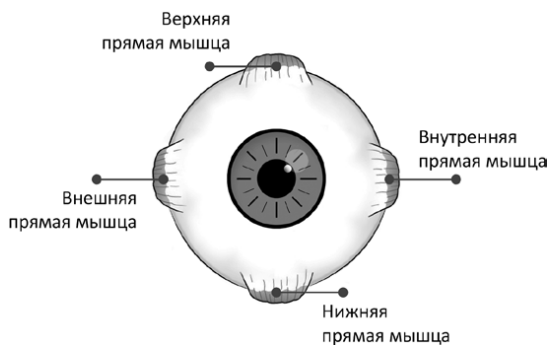


Рис. 1. Прямые мышцы глаза

В работе для упрощения эксперимента и обработки данных задача идентификации решается для случая движения зрачка по горизонтали ($v=1$ и $\mu=1$), т. е. на основе модели (1).

Задача идентификации (построения модели) в виде (1) или (2) заключается в определении ЯВ на основе экспериментальных данных «вход-выход» НДС. Построение модели состоит в выборе тестовых воздействий $x(t)$ и разработке алгоритма, который позволяет по измеренным реакциям $y(t)$ выделять парциальные составляющие $y_n(t)$ и определять на основе их ЯВ $w_n(\tau_1, \dots, \tau_n)$, $n=1, 2, \dots$ [12, 13].

5. Вычислительный метод идентификации многомерных переходных характеристик

С учетом специфики исследуемого объекта для идентификации используются тестовые многоступенчатые сигналы [14].

Если тестовый сигнал $x(t)$ представляет собой единичную функцию (функцию Хевисайда) – $\theta(t)$, то результатом идентификации является переходная функция первого порядка $\hat{h}_1(t)$ и диагональные сечения n -го порядка $\hat{h}_n(t, \dots, t)$.

Для определения поддиагональных сечений переходных функций n -го порядка ($n \geq 2$) НДС испытывается с помощью n тестовых ступенчатых сигналов с заданными амплитудой и различными интервалами между сигналами. При соответствующей обработке откликов получим поддиагональные сечения n -мерных переходных функций характеристик $h_n(t-\tau_1, \dots, t-\tau_n)$, которые представляют собой n -мерные интегралы от ЯВ n -го порядка $w_n(\tau_1, \dots, \tau_n)$:

$$\begin{aligned}
 h_n(t-\tau_1, \dots, t-\tau_n) = & \int_0^\infty \dots \int_0^\infty w_n(t-\tau_1-\lambda_1, \dots, t-\tau_n-\lambda_n) d\lambda_1 \dots d\lambda_n.
 \end{aligned} \tag{3}$$

Метод определения сечений n -мерных переходных функций основывается на утверждении, доказательство которого аналогично приведенному в [15].

Утверждение. Пусть тестовые воздействия представляют собой сумму k ($k=1, 2, \dots, n$) ступенчатых сигналов $x_i(t) = a\theta(t-\tau_i)$ ($i=1, 2, \dots, k$), со сдвигом по времени t на τ_1, \dots, τ_k , тогда, для НДС с одним входом и одним выходом, оценка сечения переходной характеристики n -го порядка:

$$\begin{aligned}
 \hat{h}_n(t-\tau_1, \dots, t-\tau_n) = & \frac{(-1)^n}{n! a^n} \sum_{\delta_{\tau_1}, \dots, \delta_{\tau_n}=0}^1 (-1)^{\sum_{i=1}^n \delta_{\tau_i}} y(t, \delta_{\tau_1}, \dots, \delta_{\tau_n}),
 \end{aligned} \tag{4}$$

где $y_n(t, \delta_{\tau_1}, \dots, \delta_{\tau_n})$ – отклик НДС, измеренный в момент времени t , при действии на ее входе многоступенчатого сигнала с амплитудой a , причём если $\delta_{\tau_i} = 1$ ($i=1, 2, \dots, n$), то тестовое воздействие содержит ступенчатый сигнал со сдвигом на τ_i , в противном случае, при $\delta_{\tau_i} = 0$ – его не содержит.

Например, для определения переходной характеристики второго порядка сначала НДС испытывается ступенчатыми сигналами со сдвигами по времени на τ_1 и τ_2

$$x_1(t) = a\theta(t-\tau_1) \text{ и } x_2(t) = a\theta(t-\tau_2), \tag{5}$$

измеряются соответствующие отклики $y(t, 1, 0)$ и $y(t, 0, 1)$. Затем, подают на вход НДС двухступенчатый сигнал

$$x(t) = a\theta(t-\tau_1) + a\theta(t-\tau_2), \tag{6}$$

и из полученного отклика $y(t, 1, 1)$ вычитаются отклики на одиночные ступенчатые сигналы

$$y(t, 1, 1) - y(t, 1, 0) - y(t, 0, 1) = 2a^2 \hat{h}_2(t-\tau_1, t-\tau_2). \tag{7}$$

Из (7), после нормировки, следует

$$\hat{h}_2(t-\tau_1, t-\tau_2) = \frac{1}{2a^2} [y(t, 1, 1) - y(t, 1, 0) - y(t, 0, 1)]. \tag{8}$$

При фиксированных значениях τ_1 и τ_2 оценка переходной характеристики второго порядка $\hat{h}_2(t - \tau_1, t - \tau_2)$ представляет собой функцию от переменной t – сечение поверхности $\hat{h}_2(t_1, t_2)$ плоскостью, проходящей под углом в 45° к осям t_1 и t_2 и сдвинутой по оси t_1 на величину $\tau_0 = \tau_1 - \tau_2$. Изменяя величину τ_0 , получаем различные сечения $\hat{h}_2(t, t - \tau_0)$, по которым можно восстановить всю поверхность $\hat{h}_2(t_1, t_2)$. При $\tau_1 = \tau_2 = 0$, получаем диагональное сечение $\hat{h}_2(t, t)$.

6. Информационная технология получения экспериментальных данных для идентификации ГДА

Структурная схема системы, реализующей предлагаемую технологию, представлена на рис. 2. Система включает:

1. Управляющий модуль, состоящий из блоков: генератора тестовых сигналов (ГТС), устройства управления (УУ).

2. Регистрирующий модуль, состоящий из блоков: интеллектуальной обработки данных (ИОД), отображения результатов эксперимента (Дисплей), базы данных для хранения результатов эксперимента (БД).

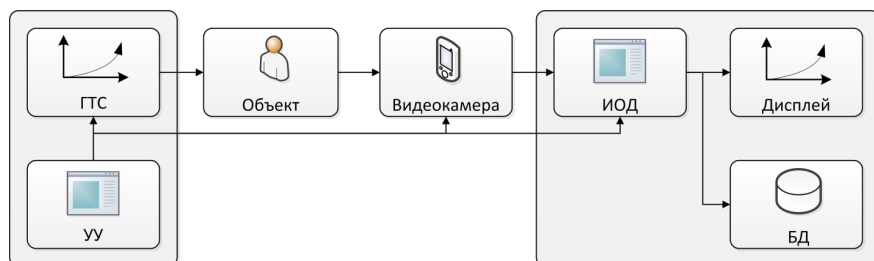


Рис. 2. Структурная схема системы отслеживания движения зрачка

Эксперимент, реализуемый при помощи предложенной системы отслеживания поведения зрачка на основе видеорегистрации проводится в такой последовательности.

1. Голова наблюдаемой персоны располагается перед регистрирующим устройством (видеокамерой) на известном расстоянии.

2. В определенные промежутки времени на Дисплее появляется графический тестовый сигнал в виде яркой точки (светового пятна). В то же время включается видеокамера для записи движения глаза от начального (стартового) положения до положения (финального), определяемого световым пятном (тестовым сигналом).

3. После совершения серии экспериментов с ГДА при различных возмущениях (не менее 2-х тестовых сигналов) эксперимент завершается. Файл с видео записью перемещения зрачка сохраняется в памяти системы.

4. После завершения эксперимента «вход–выход» запускается приложение, реализующее интеллектуальный алгоритм обнаружения объекта (зрачка) в отснятом видеоряде. Строится график зависимости изменения положения зрачка от времени (реакции на тестовое воздействие).

5. Полученные данные сохраняются в базе данных и выводятся на Дисплей.

7. Результаты идентификации – переходные характеристики ГДА

Апробация технологии отслеживания поведения зрачка на основе видео регистрации проводится на примере задачи анализа работы глазодвигательного аппарата вдоль горизонтальной оси.

При этом входной (тестовый) сигнал – расстояние от основания перпендикуляра, опущенного из центра зрачка глаза до плоскости, в которой формируется возмущение – источник света, до точки источника (светового пятна) в горизонтальной плоскости. Измеряемым откликом (выходной сигнал) является функция текущего отклонения зрачка в кадре изображения видеорегастратора от начальной точки, зависящая от времени.

Для определения диагонального сечения переходной характеристики второго порядка сперва объект испытывается ступенчатым сигналом с амплитудой a (расстояние по горизонтали до светового пятна от начальной точки, определяемой исходным положением зрачка)

$$x_1(t) = a\theta(t), \quad (9)$$

и измеряется соответствующий отклик $y_1(t)$. Затем, при нулевых начальных условиях подают на вход объекта сигнал с удвоенной амплитудой a

$$x_2(t) = 2a\theta(t), \quad (10)$$

и из полученного при этом отклика $y_2(t)$ вычитается удвоенный отклик $y_1(t)$. После нормировки полученной разности, получим

$$\hat{h}_2(t, t) \cong \frac{y_2(t) - 2y_1(t)}{2a^2}. \quad (11)$$

Для определения переходной характеристики первого порядка, получаем выражение

$$\hat{h}_1(t) \cong \frac{y_1(t)}{a}, \quad (12)$$

Измеренные отклики глаза $y_1(t)$ и $y_2(t)$ на входные тестовые сигналы $a\theta(t)$ и $2a\theta(t)$ представлены на рис. 3, соответственно.

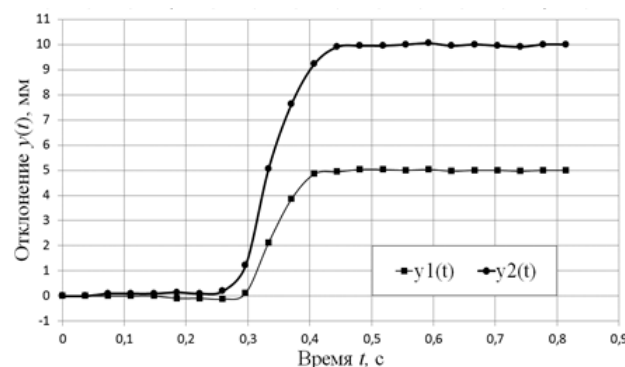


Рис. 3. Отклики объекта $y_1(t)$, $y_2(t)$

Полученные графики переходных характеристик ГДА первого $\hat{h}_1(t)$ и второго порядков $\hat{h}_2(t,t)$ представлены на рис. 4, 5, соответственно.

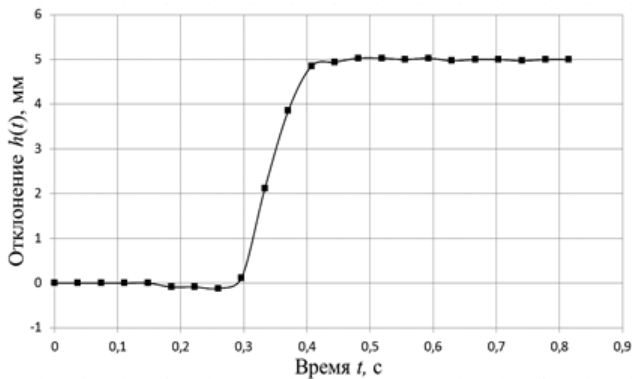


Рис. 4. Переходная характеристика $\hat{h}_1(t)$

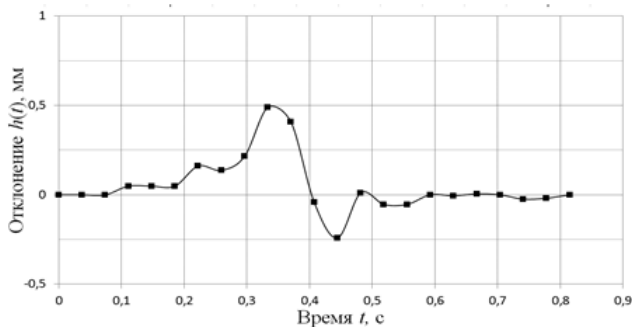


Рис. 5. Переходная характеристика $\hat{h}_2(t,t)$

Сравнение отклика построенной модели с экспериментальными данными – откликом объекта идентификации $y(t)$ – представлено на рис. 6.

$$\hat{y}(t) = a\hat{h}_1(t) + 2a^2\hat{h}_2(t,t). \quad (13)$$

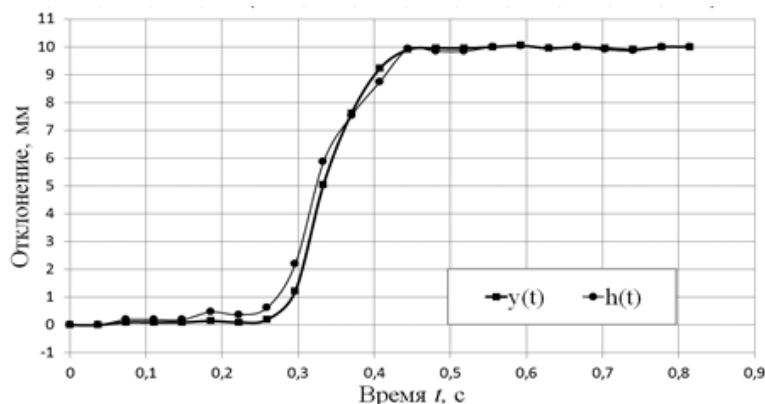


Рис. 6. Сравнение откликов объекта идентификации $y(t)$ и модели $\hat{y}(t)$

Приведенные графики практически совпадают (среднеквадратическое отклонения $\epsilon=0,31$) что подтверждает эффективность вычислительного алгоритма идентификации и адекватность построенной модели на основе данных эксперимента «вход-выход».

8. Инструментальные программные средства идентификации

Разработано программное обеспечение для построения непараметрических динамических моделей исследуемых объектов, реализующее вычислительный метод определения многомерных переходных характеристик на основе данных экспериментов «вход-выход» с использованием тестовых многупеппчатых сигналов [14].

В системе Matlab создан комплекс программ идентификации нелинейных динамических систем на основе моделей Вольтерра во временной области – «Tools of Identification Nonlinear Dynamic Objects» (TINDO). Для управления процессами моделирования и идентификации в среде MATLAB разработан GUI. Структурная схема комплекса программ TINDO представлена на рис. 7.

Интерфейс состоит из отдельных независимых модулей: модуля моделирования – Modeling; модуля идентификации – Identification; модуля управления параметрами процессов идентификации и моделирования – Configurator; модуля сглаживания шумов Denoise.

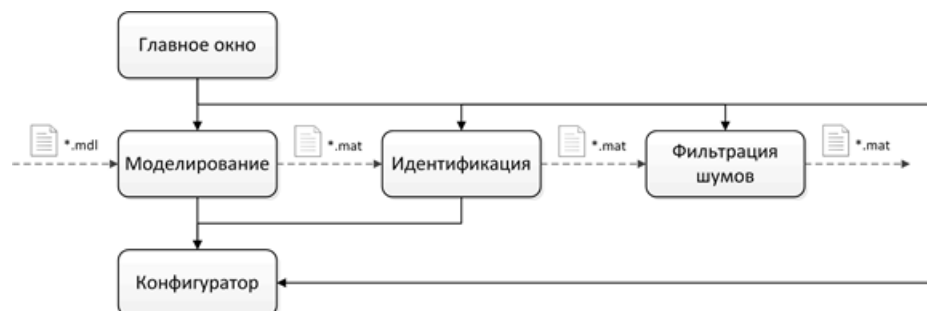


Рис. 7. Структурная схема комплекса программ идентификации TINDO

9. Выводы

Предложен метод построения непараметрической динамической модели глазо-двигательного аппарата человека с учётом его инерционных и нелинейных свойств на основе данных экспериментов «вход-выход».

Получила дальнейшее развитие информационная технология получения экспериментальных данных для идентификации глазо-двигательного аппарата при помощи видеорегистрации, позволяющая определять динамические характеристики зрительного аппарата по экспериментальным данным наблюдений «вход-выход».

Предложенная технология отслеживания поведения зрачка не нуждается в специальном оборудовании и лабораторных условиях проведения эксперимента и доступна для широкого применения.

Важной особенностью технологии является нетребовательность к аппаратному обеспечению, что открывает возможность её использования в приложениях современных мобильных устройств.

Разработан вычислительный метод идентификации многомерных динамических (переходных) характеристик глазо-двигательного аппарата с использованием тестовых многоступенчатых сигналов. Разработаны инструментальные программные средства информационной технологии построения непараметрической динамической модели глазо-двигательного аппарата на основе данных экспериментов «вход–выход».

На основе экспериментальных данных с применением разработанных вычислительных алгоритмов и программных средств обработки данных получена непараметрическая динамическая модель глазо-двигательного аппарата человека в виде переходной и двумерной переходной характеристик. Верификация построенной модели показала адекватность ее исследуемому объекту – практическое совпадение (в пределах приемлемой погрешности) откликов объекта и модели при одном и том же тестовом воздействии.

Полученные результаты идентификации глазо-двигательного аппарата человека будут использоваться в диагностических исследованиях в качестве источника первичных данных на основе информационной технологии, представленной в [16–18].

Литература

1. Kepler, J. Biomechanical Modelling of the Human Eye [Text] / J. Kepler U. Linz. – Netzwerk für Forschung, Lehrend / Praxis, Linz, 2004. – 231 p.
2. Guestrin, E. D. General Theory of Remote Gaze Estimation Using the Pupil Center and Corneal Reflections [Text] / E. D. Guestrin, M. Eizenman // IEEE Transactions on biomedical engineering. – 2006. – Vol. 53, Issue 6. – P. 1124–1133. doi: 10.1109/tbme.2005.863952
3. Глазные болезни. Основы офтальмологии [Текст] / под ред. В. Г. Копачевой. – М.: Медицина, 2012. – 552 с.
4. Шамшинова, А. М. Функциональные методы исследования в офтальмологии [Текст] / А. М. Шамшинова, В. В. Волков. – ГЭОТАР-Медиа, 1999. – 416 с.
5. Базиян, Б. Х. Использование анализа траекторий движений глаз, головы и руки для ранней функциональной диагностики болезни Паркинсона [Текст] / Б. Х. Базиян, Л. А. Чигалейчик, Е. Л. Тесленко, Д. Р. Лачинова // Бюллетень экспериментальной биологии и медицины. – 2007. – Т. 143, № 5. – С. 484–486.
6. Jansson, D. Stochastic anomaly detection in eye-tracking data for quantification of motor symptoms in Parkinson's disease [Text] / D. Jansson, A. Medvedev, H. Axelson, D. Nyholm // Advances in Experimental Medicine and Biology. – 2015. – Vol. 823. – P. 63–82. doi: 10.1007/978-3-319-10984-8_4
7. Jansson, D. Volterra modeling of the smooth pursuit system with application to motor symptoms characterization in Parkinson's disease [Text] / D. Jansson, A. Medvedev // European Control Conference (ECC), 2014. – P. 1856–1861. doi: 10.1109/ecc.2014.6862207
8. Westwick, D. T. Methods for the Identification of Multiple-Input Nonlinear Systems [Text] / D. T. Westwick. – Departments of Electrical Engineering and Biomedical Engineering, McGill University, Montreal, Quebec, Canada, 1995.
9. Giannakis, G. B. A bibliography on nonlinear system identification and its applications in signal processing, communications and biomedical engineering [Text] / G. B. Giannakis, E. A. Serpedin // Signal Processing. – 2001. – Vol. 81, Issue 3. – P. 533–580. doi: 10.1016/s0165-1684(00)00231-0
10. Doyle, F. J. Identification and Control Using Volterra Models [Text] / F. J. Doyle, R. K. Pearson, B. A. Ogunnaike. – Published Springer Technology & Industrial Arts, 2001. – 314 p.
11. Сидоров, Д. Н. Методы анализа интегральных динамических моделей: теория и приложения [Текст] / Д. Н. Сидоров. – Иркутск: Изд. ИГУ, 2013. – 293 с.
12. Boyd, S. Measuring Volterra Kernels [Text] / S. Boyd, Y. S. Jang, L. O. Chua // IEEE Trans. on Circuits and Systems. – 1983. – Vol. 30, Issue 8. – P. 571–578. doi: 10.1109/tcs.1983.1085391
13. Павленко, В. Д. Методы детерминированной идентификации нелинейных систем в виде моделей Вольтерра [Текст] / В. Д. Павленко, С. В. Павленко // XII Всероссийское совещание по проблемам управления ВСПУ-2014. – М.: Ин-т проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, 2014. – С. 2830–2841.
14. Масри, М. М. Построение аппроксимационной модели Вольтерра нелинейной системы с помощью многоступенчатых тестовых сигналов [Текст]: сб. науч. пр. / М. М. Масри // Математичне та комп'ютерне моделювання Серія: Технічні науки. – Інститут кібернетики ім. В.М. Глушкова НАН України, Кам'янець-Подільський національний університет ім. Івана Огієнка. – 2014. – Вип. 11. – С. 107–116.
15. Павленко, В. Д. Компенсационный метод идентификации нелинейных динамических систем в виде ядер Вольтерра [Текст] / В. Д. Павленко // Труды Одесск. политехн. ун-та. – 2009. – Вып. 2 (32). – С. 121–129.
16. Pavlenko, V. Methods For Black-Box Diagnostics Using Volterra Kernels [Text] / V. Pavlenko, A. Fomin // Proc. of the 2nd Int. Conf. on Inductive Modelling (ICIM'2008). Kyiv, Ukraine, 2008. – P. 104-107.
17. Pavlenko, V. Method for Modeling and Fault Simulation using Volterra kernels [Text] / V. Pavlenko, A. Fomin // Proc. 6th IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTS'08). Lviv, Ukraine, 2008. – P. 204–207.
18. Павленко, В. Д. Информационная технология модельной диагностики нелинейных объектов [Текст] / В. Д. Павленко, А. А. Фомин // Информатика и математические методы в моделировании. – 2011. – Т. 1, № 1. – С. 57–65.