



УДК 53.083.92

Г. Н. Лукьянов, С. А. Полищук, И. С. Ковальский, А. Г. Малышев
Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет
информационных технологий, механики и оптики

Нелинейное динамическое моделирование взаимосвязи концентрации углекислого газа с давлением воздуха при вдохе и выдохе человека на основе проведенных измерений

Представлена нелинейная динамическая модель на основе алгоритма метода NARMAX, дающая связь результатов измерений концентрации углекислого газа с давлением воздуха при вдохе и выдохе человека. Эта модель связывает характерные особенности изменения давления в процессе дыхания человека с концентрацией углекислого газа во вдыхаемом-выдыхаемом воздухе при синхронном измерении. Использование фильтрации совмещенной модели концентрации углекислого газа и давления воздуха по данному методу позволяет разложить полученную модель на независимые исходные модели.

Нелинейное динамическое моделирование, NARMAX, концентрация углекислого газа, давление воздуха, синхронизация

Показано, что существует синхронизация процессов дыхания и сердцебиения, которая зависит от состояния человека (покой, физическая нагрузка) и состояния его здоровья [1], [2]. Соответственно, существуют и другие синхронно связанные друг с другом аспекты деятельности человеческого организма, например концентрация углекислого газа и давление воздуха при вдохе и выдохе человека. Математическая модель процессов, протекающих в человеческом организме, может быть получена как на основе физических представлений, так и статистическими методами, опирающимися на результаты экспериментальных данных исследуемых процессов. Процессы, изменяющиеся во времени, а именно динамические процессы, описываются при помощи динамического моделирования, т. е. в этом случае строятся динамические модели. Такие модели могут быть использованы для описания индивидуальных особенностей процессов, которые протекают в организме конкретного человека. Это помогает проводить исследование особенностей функционирования систем его организма, что существенно облегчает мониторинг состояния здоровья человека.

Для построения динамических моделей можно применять, например, метод ARMAX (Auto-Regressive Moving Average with Exogeneous Inputs, авторегрессивная модель скользящего математического ожидания с внешними входами), реализованный в пакете MATLAB. Однако процедура ARMAX строит только линейные модели и ее целевая функция линейна по управляющим переменным. Для устранения этих недостатков разработана нелинейная модель на основе метода NARMAX (Non-Linear Auto-Regressive Moving Average with Exogeneous Inputs, нелинейная авторегрессивная модель скользящего математического ожидания с внешними входами) [3], которая обладает следующими достоинствами:

- 1) подходит для описания обширной области нелинейного динамического поведения процессов;
- 2) удобна для описания реальных процессов, к которым, в частности, относятся процессы дыхания [4] и сердцебиения у человека [1], [2].

Целью настоящей статьи является апробация применения метода NARMAX для построения общих моделей концентрации углекислого газа давления воздуха при вдохе и выдохе человека, которые получены на основе проведенных син-

хронных измерений, а также построение общих моделей концентрации углекислого газа с учетом давления воздуха для каждой ноздри. Для этого нужно решить задачу нелинейного динамического моделирования на основе экспериментально зарегистрированных рядов наблюдений информационных процессов. Информацией для построения нелинейной динамической модели NARMAX служат результаты синхронных измерений концентрации углекислого газа и давления воздуха при вдохе и выдохе человека для правой и левой ноздрей, что позволяет построить общую модель для трех входов и двух выходов и что говорит о научной новизне данной работы.

В работе впервые продемонстрировано применение метода NARMAX для построения моделей концентрации углекислого газа и давления воздуха при вдохе и выдохе человека, т. е. процессов, протекающих в организме человека. Метод NARMAX, используя ортогонализацию, позволяет в сжатой форме хранить данные об обследованиях пациентов, на основе которых можно восстановить сведения о предыдущем состоянии здоровья пациента, сравнивая его с проводимым обследованием в данный момент. Также метод NARMAX может быть применен в качестве цифрового фильтра, т. е. применение данного метода для нелинейного динамического моделирования информационных процессов (дыхание и сердцебиение) дает возможность отфильтровывать шумы, имеющиеся в процессах.

В работе исследовалась модель с тремя входами (экспериментально зарегистрированные результаты измерений концентрации углекислого газа, давление воздуха в правой и левой ноздре). В экспериментах использовался прибор производства ООО «ЛЕД-Микросенсор» для измерения концентрации углекислого газа и давления воздуха при вдохе и выдохе человека, не искажающий его естественное дыхание (рис. 1).

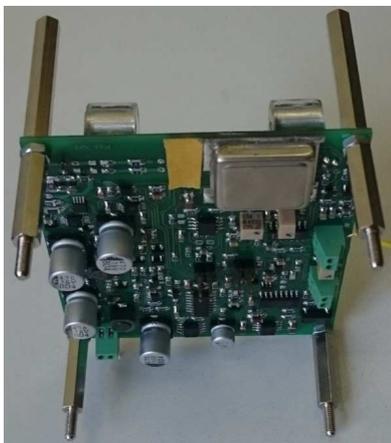


Рис. 1

Общая модель, дающая связь результатов измерений концентрации углекислого газа с давлением воздуха при вдохе и выдохе человека, построенная при помощи метода NARMAX, позволяет исследовать взаимосвязь указанных процессов. Вышеизложенное говорит о научной новизне этой работы.

Описание проблемы. Известно, что процессы, протекающие в природе, в большинстве случаев периодические, нелинейные и динамические, например процессы теплообмена при дыхании и сердцебиения у человека также периодические, нелинейные и динамические [1], [2].

Соответственно, экспериментально зарегистрированные ряды наблюдений концентрации углекислого газа синхронно с давлением воздуха при вдохе и выдохе человека обладают нелинейной динамикой. Поэтому необходимо построить общую модель описываемых процессов так, чтобы она также обладала нелинейной динамикой.

Решение проблемы. Была использована модель NARMAX [3]. Она представляет собой полиномиальное выражение, состоящее из последовательности многочленов. Численные коэффициенты одночленов, входящих в состав многочленов данной последовательности, представляют собой элементы матрицы коэффициентов, которая встраивается в эту последовательность, оканчивая итерационный процесс построения модели. Это видно из представленного далее сопоставления результатов измерений процесса теплообмена при дыхании человека и расчета по модели.

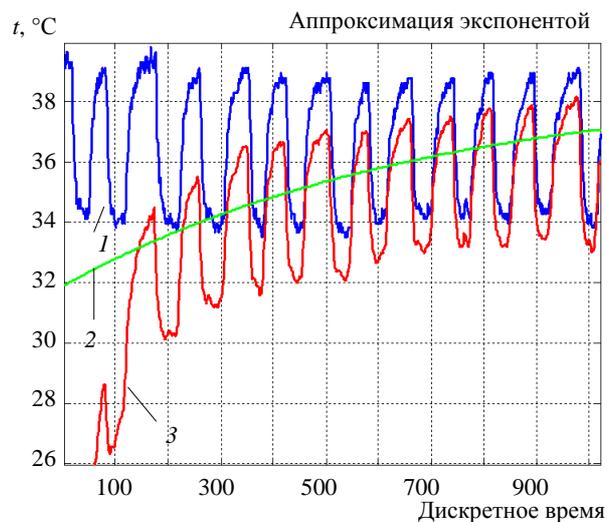


Рис. 2

Модель (рис. 2, кривая 2) ведет себя как реальный физический прибор, подстраиваясь под описываемый процесс (кривая 1, значения температуры вдыхаемого-выдыхаемого воздуха на входе в ноздри) по экспоненте (кривая 3). На рисунке показан принцип действия метода NARMAX для построения нелинейных динамических моделей на примере процесса теплообмена при дыхании, включающий в себя «окно» (собственно сам рисунок), по которому «ползет» модель по процессу (кривая 1), моделируемый процесс, расчет модели процесса (кривая 2).

Рассмотрим данный принцип более подробно. Ширина представленного «окна» может включать в себя от ~100 до ~1000 значений зарегистрированных рядов наблюдений процесса. Это выявлено экспериментально. Расчет модели процесса в «окне» ведет себя как реальный физический прибор и поэтому подстраивается под процесс экспоненциально, как показано на рис. 2. Конечное действие метода NARMAX при построении нелинейных динамических моделей состоит в выводе последнего значения расчета модели в «ползущем» по процессу «окне» с последующим продвижением «окна» по процессу с выводом следующего конечного значения расчета модели. Также модель может быть использована в качестве цифрового фильтра, который может очищать входной сигнал от нежелательных помех и ненужных для исследования частот. Сейчас разрабатывается математический аппарат для адаптивной настройки этого фильтра.

Для моделирования общих моделей концентрации углекислого газа и давления воздуха при вдохе и выдохе человека на входах в ноздри с одновременным синхронным измерением параметров концентрации углекислого газа.

Аналитически действие метода NARMAX можно представить на примере работы с полиномиальными выражениями, состоящими из последовательностей многочленов, которыми математически представлены модели концентрации углекислого газа и давления воздуха при вдохе и выдохе человека. Метод NARMAX, используя процедуру ортогонализации, позволяет произвольно менять степень таких многочленов. Эта особенность данного метода использована для фиксирования всех зубцов исследуемых процессов, т. е. повышения чувствительности модели. При этом на каждой итерации действия метода NARMAX не только идет подбор степени многочлена, но и проверяются коэффициенты на зна-

чимостью вклада в модель. Малозначимые коэффициенты метод NARMAX отбрасывает – одночлены с данными коэффициентами в составе многочленов умножаются на ноль. В ходе многочисленных экспериментов по применению метода NARMAX для построения моделей, указанных в работе процессов, выявлено, что процедура ортогонализации останавливает процесс выбора степени многочлена и осуществляется на основе соотношения дисперсий процессов и их моделей.

Модель концентрации углекислого газа:

$$Y_1(t) = \sum_{i=0}^n a_i (t - \tau)^i, \quad (1)$$

где (a_0, a_1, \dots, a_n) – это столбцы матрицы коэффициентов модели концентрации углекислого газа; t – дискретное время; τ – временная задержка, в данном случае равная нулю.

Модель давления воздуха в правой ноздре:

$$Y_2(t) = \sum_{i=0}^n b_i (t - \tau)^i, \quad (2)$$

где (b_0, b_1, \dots, b_n) – это столбцы матрицы коэффициентов модели давления воздуха в правой ноздре.

Модель давления воздуха в левой ноздре:

$$Y_3(t) = \sum_{i=0}^n c_i (t - \tau)^i, \quad (3)$$

где (c_0, c_1, \dots, c_n) – это столбцы матрицы коэффициентов модели давления воздуха в левой ноздре.

Общая модель концентрации углекислого газа совместно с давлением воздуха в правой ноздре:

$$Y_{O_1}(t) = \sum_{i=0}^n (a_i + k b_i)(t - \tau)^i. \quad (4)$$

Общая модель концентрации углекислого газа совместно с давлением воздуха в левой ноздре:

$$Y_{O_2}(t) = \sum_{i=0}^n (a_i + k c_i)(t - \tau)^i, \quad (5)$$

где k – специальный множитель, при изменении которого идет настройка общей модели.

Столбцы матрицы коэффициентов модели дыхания (a_0, a_1, \dots, a_n) (1) в общих моделях (4), (5) влияют на поведение общей модели, которое становится сходным с моделью концентрации углекислого газа. Столбцы матрицы коэффициентов модели (b_0, b_1, \dots, b_n) (2) и (c_0, c_1, \dots, c_n) (3)

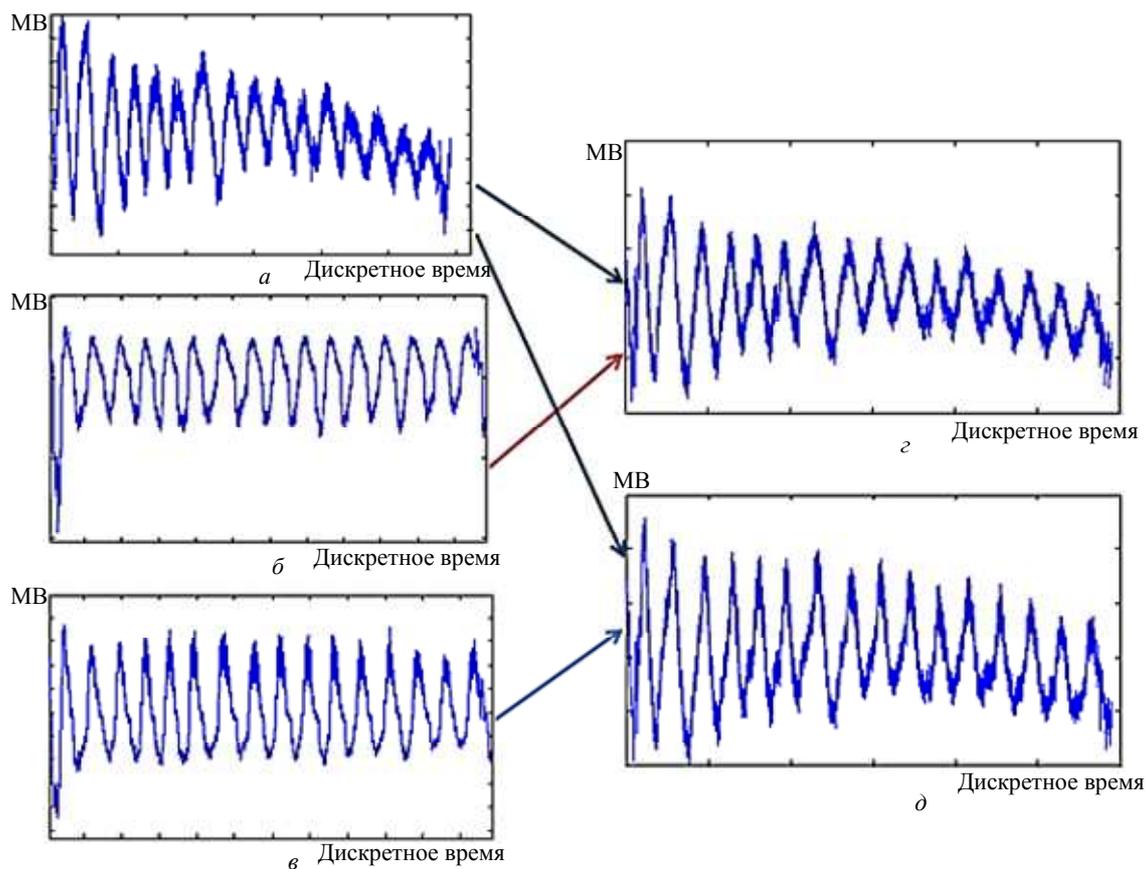


Рис. 3

оказывают влияние на проявление характерных особенностей моделей с давлением воздуха в правой и левой ноздрях соответственно.

Графически модели, дающие связь результатов измерений концентрации углекислого газа с давлением воздуха при вдохе и выдохе человека, представлены на рис. 3.

Эти модели показывают соотношения взаимодействия вдоха и выдоха человека с концентрацией углекислого газа. На рис. 3, *а* представлен график зависимости концентрации углекислого газа, т. е. сигнала поданного на 1-й вход в модель NARMAX. На рис. *б* представлен график зависимости давления воздуха в правой ноздре, т. е. сигнала, поданного на 2-й вход в модель. На рис. *в* представлен график зависимости давления воздуха в левой ноздре, т. е. сигнала, поданного на 3-й вход в модель. На рис. *г* представлена общая модель концентрации углекислого газа с давлением воздуха в правой ноздре, т. е. сигнал, исходящий из первого выхода модели NARMAX. На рис. *д* представлена общая модель концентрации углекислого газа с давлением воздуха в левой ноздре, т. е. сигнал, исходящий из второго выхода

модели. Общие модели содержат информацию о поведении процесса давления при дыхании и о концентрации углекислого газа.

Практические результаты. В процессе проведения исследования были получены следующие результаты.

1. Ортогонализация метода NARMAX дает возможность хранить данные об обследовании пациентов в сжатой форме, что позволяет быстро получить сведения предыдущих исследований состояния здоровья пациента для сравнения их с проводимым в данный момент обследованием.

2. Общие модели давления и концентрации углекислого газа, построенные методом NARMAX, применимы в области исследования взаимосвязи указанных процессов.

Проведено исследование возможностей применения метода NARMAX для построения модели с несколькими входами и несколькими выходами. На основе метода NARMAX созданы статистические динамические модели, описывающие результаты измерений концентрации углекислого газа и давления воздуха при вдохе и выдохе человека как в отдельности, так и во взаимосвязи.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Лукьянов Г. Н., Воронин А. А. Экспериментальные исследования взаимодействия процессов дыхания и сердцебиения // Биотехносфера. 2011. № 5-6. С. 18–22.

2. Лукьянов Г. Н., Полищук С. А. Нелинейное динамическое моделирование взаимосвязи процессов дыхания и сердцебиения человека на основе проведенных измерений // Науч.-техн. вестн. информационных технологий, механики и оптики. 2013. № 4 (86). С. 67–72.

3. Billings S. A. Orthogonal least squares methods and their application to non-linear system identification // Int. J. Control. 1989. Vol. 50, № 5. P. 1873–1896.

4. Исследование тепло- и массообменных характеристик человеческого дыхания / Г. Н. Лукьянов, А. Рассадина, О. А. Дранишникова, Е. В. Скирмант, В. И. Усачев // Приборостроение. 2005. № 5. С. 68–73.

G. N. Lukyanov, S. A. Polishchuk, I. S. Kowalski, A. G. Malyshev

Saint Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics

NONLINEAR DYNAMIC MODELING OF THE RELATIONSHIP BETWEEN THE CONCENTRATION OF CARBON DIOXIDE WITH THE AIR PRESSURE WHEN YOU INHALE AND EXHALE OF A MAN ON THE BASIS OF THE MEASUREMENTS

Presents a nonlinear dynamic model based on the algorithm of the method of Non-Linear Auto-Regressive Moving Average with Exogeneous Inputs, giving the relationship of the results of measurements of carbon dioxide concentrations with air pressure during inhalation and exhalation of the person. This model associates the characteristics of the variation of the pressure in the breathing process of a person with the concentration of carbon dioxide in the inhaled-exhaled air in simultaneous measurement. The use of filtration combined model of carbon dioxide concentrations and air pressure according to this method allows us to decompose the obtained model independent of the original model.

Nonlinear dynamic modeling, NARMAX, carbon dioxide concentration, air pressure, synchronization
