



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 результатов синхронных измерений концентрации углекислого газа с давлением воздуха при вдохе и выдохе человека

Представлено нелинейное динамическое моделирование результатов синхронных измерений концентрации углекислого газа с давлением воздуха при вдохе и выдохе человека методом Non-Linear Auto-Regressive Moving Average with Exogenous Inputs (NARMAX). Моделирование связывает характерные особенности изменения давления в процессе дыхания человека с концентрацией углекислого газа во вдыхаемом/выдыхаемом воздухе при синхронном измерении. Произведено сравнение хаотических инвариантов результатов измерений – корреляционной размерности и энтропии – концентрации углекислого газа с давлением воздуха при вдохе и выдохе человека с представленной моделью.

Нелинейное динамическое моделирование, NARMAX, концентрация углекислого газа, давление воздуха, синхронизация, корреляционная размерность, корреляционная энтропия

Известно, что существует синхронизация процессов дыхания и сердцебиения человека, которая зависит от его состояния (покой, физическая нагрузка) и здоровья [1], [2]. Наряду с этим существуют и другие синхронно связанные аспекты деятельности человеческого организма, например, концентрация углекислого газа с давлением 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. Изменяющиеся во времени (динамические) процессы описываются при помощи динамического моделирования – построения динамических моделей. Такие модели могут быть использованы для описания индивидуальных особенностей процессов, которые протекают в организме конкретного человека, что позволяет исследовать особенности функционирования систем его организма, существенно облегчая мониторинг состояния здоровья.

Для построения динамических моделей в пакете MATLAB реализован, в частности, метод ARMAX (Auto-Regressive Moving Average with

Exogenous Inputs). 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 Exogenous Inputs) [3], которая обладает следующими достоинствами:

- подходит для описания обширной области нелинейного динамического поведения процессов;
- удобна для описания реальных процессов, которыми, в частности, являются процессы дыхания [4] и сердцебиения человека [1], [2].

В настоящей статье представлены методика и результаты апробации применения метода NARMAX для построения общих моделей синхронизации концентрации углекислого газа с давлением воздуха при вдохе и выдохе человека, а также для построения общих моделей синхронизации концентрации углекислого газа с давлением воздуха для каждой ноздри. В результате создания моделей решена задача нелинейного динамического моделирования на основе экспериментально зарегистрированных рядов наблюдений информационных процессов.

Базой для построения нелинейной динамической модели NARMAX явились результаты синхронных измерений концентрации углекислого газа и давления воздуха при вдохе и выдохе человека для правой и левой ноздри, что позволило построить общую модель с тремя входами и двумя выходами, чем определяется научная новизна статьи.

В статье впервые продемонстрировано применение метода NARMAX для построения моделей связи концентрации углекислого газа с давлением воздуха при вдохе и выдохе человека. Метод NARMAX, используя ортогонализацию, позволяет в сжатой форме хранить данные об обследованиях, на основе которых можно восстановить сведения о предыдущем состоянии здоровья пациента, сравнивая его с проводимым обследованием в данный момент. В процессе динамического моделирования в методе NARMAX может быть применен цифровой фильтр для отфильтровывания имеющихся во входных данных шумов.

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.

Экспериментальные данные, использованные для построения моделей, получены с использованием прибора производства ООО "ЛЕД-Микро-сенсор" (рис. 1), не искажающего естественное дыхание человека.

Описание проблемы. Процессы, протекающие в природе, в большинстве случаев являются периодическими, нелинейными и динамическими. К таким процессам относится, в частности, процесс теплообмена при дыхании человека [1], [2]. Поэтому ряды наблюдений концентрации углекислого газа, экспериментально зарегистрированные синхронно с давлением воздуха при вдохе и выдохе человека, обладают нелинейной динамикой.



Рис. 1

Для адекватного математического описания таких процессов нелинейная динамическая модель должна обладать теми же характеристиками нелинейной диссипативной системы, что и сам процесс. Иначе говоря, процесс и его модель должны иметь близкие по значениям корреляционные размерность D_2 и энтропию K_2 . Нахождение корреляционной размерности необходимо для проверки наличия хаотической составляющей во временном ряде, а корреляционной энтропии – для определения меры потери информации о процессе с течением времени.

Решение проблемы. Использована нелинейная авторегрессивная модель скользящего математического ожидания с внешними входами по методу NARMAX [3]. Математически она представляет собой полиномиальное выражение, состоящее из последовательности многочленов, коэффициенты элементов которых являются элементами матрицы коэффициентов, встраиваемой в модель по окончании итерационного процесса ее построения. Указанный процесс проиллюстрирован далее при сопоставлении результатов измерений процесса теплообмена при дыхании человека и расчета по модели.

В рассматриваемой задаче полиномиальные выражения математически представляют модель синхронизации концентрации углекислого газа с давлением воздуха при вдохе и выдохе человека. Метод NARMAX, используя процедуру ортогонализации, позволяет произвольно менять степень этих многочленов. Эта особенность рассматриваемого метода использована для фиксации всех экстремумов исследуемых процессов, что обеспечивает повышение чувствительности модели. При этом на каждой итерации не только подбираются степени многочленов, но и проверяется значимость вклада их членов в модель. Незначимые члены метод NARMAX отбрасывает – их коэффициенты приравняются нулю.

В ходе многочисленных экспериментов по применению метода NARMAX для построения моделей дыхательной активности человека выявлено, что процедура ортогонализации устанавливает степень многочлена на основе соотношения дисперсий процессов и их моделей.

Принцип действия метода NARMAX для построения нелинейных динамических моделей рассмотрен на примере процесса теплообмена при дыхании. Из имеющегося набора данных одно- временно анализируются от 100 до 1000 отсчетов,

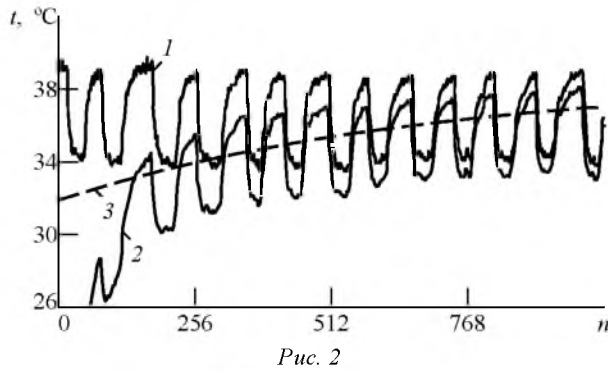


Рис. 2

составляющих апертуру ("окно") метода. Размер "окна" установлен экспериментально. Результаты работы модели представлены в виде зависимости температуры t от номера временного отсчета n (рис. 2). Модель (рис. 2, кривая 2) ведет себя как реальный физический прибор, подстраиваясь под описываемый процесс (кривая 1) по экспоненте (кривая 3). По окончании очередной итерации метод NARMAX выводит результат моделирования, после чего смещает "окно" на один отсчет и проводит очередную итерацию. Также модель используется в качестве цифрового фильтра для освобождения входного сигнала от нежелательных помех и ненужных для исследования частот. В настоящее время разрабатывается математический аппарат для адаптивной настройки этого фильтра.

Результаты моделирования синхронизации дыхательной активности человека с концентрацией углекислого газа в организме представлены на рис. 3. Модель имела три входа и два выхода. На первый вход (рис. 3, б) подавались данные об отклонении концентрации углекислого газа (ΔC_{CO_2}) при дыхании, на второй (рис. 3, а) – данные об изменении давления воздуха в правой ноздре

($\Delta p_{пр}$), на третий (рис. 3, в) – данные об изменении давления в левой ноздре ($\Delta p_{л}$). Все указанные величины нормированы на максимальные зафиксированные в эксперименте значения. Полученная по методу NARMAX на первом выходе модели взвешенная сумма концентрации углекислого газа с давлением в правой ноздре показана на рис. 3, з, аналогичная сумма давления и концентрации в левой ноздре (второй выход модели) – на рис. 3, д. Коэффициенты взвешивания членов сумм определены в результате настройки модели.

На рис. 4 представлены фазовые траектории экспериментально зарегистрированных рядов наблюдений концентрации углекислого газа (рис. 4, а), давления воздуха в правой ноздре (рис. 4, б) и в левой ноздре (рис. 4, в). Фазовые траектории исходных рядов наблюдений говорят о нелинейности, динамичности и периодичности данных рядов наблюдений.

Результаты определения хаотических инвариантов результатов измерений описываемых процессов и моделей сведены в таблицу. Близость наблюдаемых значений и значений результатов моделирования говорит об адекватности построения модели описываемых рядов наблюдений методом NARMAX.

В настоящей статье представлены результаты исследования возможностей применения метода NARMAX для построения модели с несколькими входами и несколькими выходами. На основе метода NARMAX создана статистическая динамическая модель, описывающая синхронизацию результатов измерений концентрации углекислого газа с давлением воздуха при вдохе и выдохе человека. Результаты показывают, что метод NARMAX адекватно описывает исследуемые процессы и может быть применен для построения моделей разной природы.

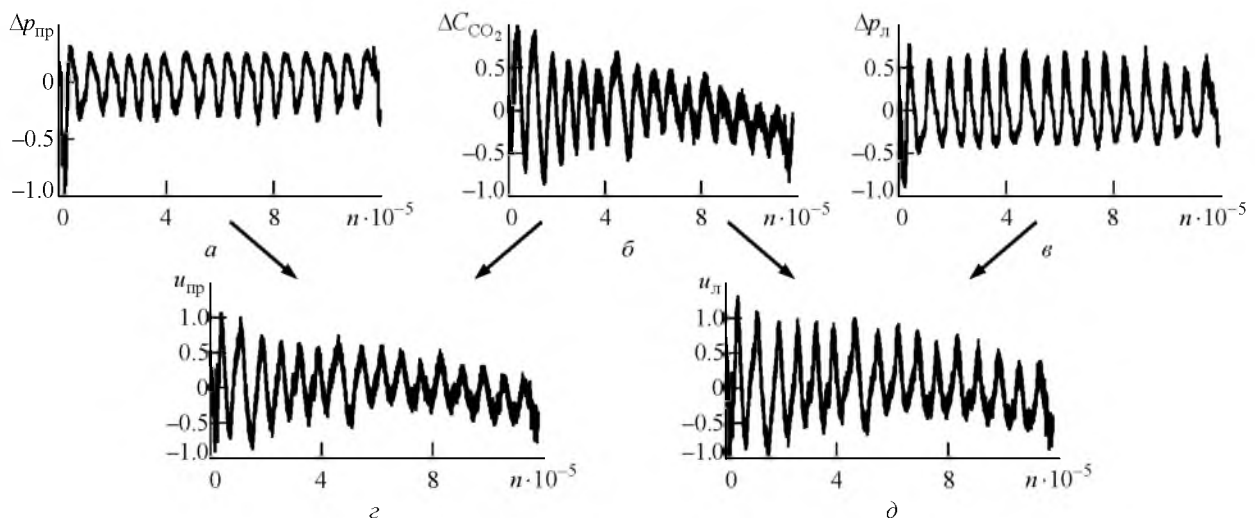


Рис. 3

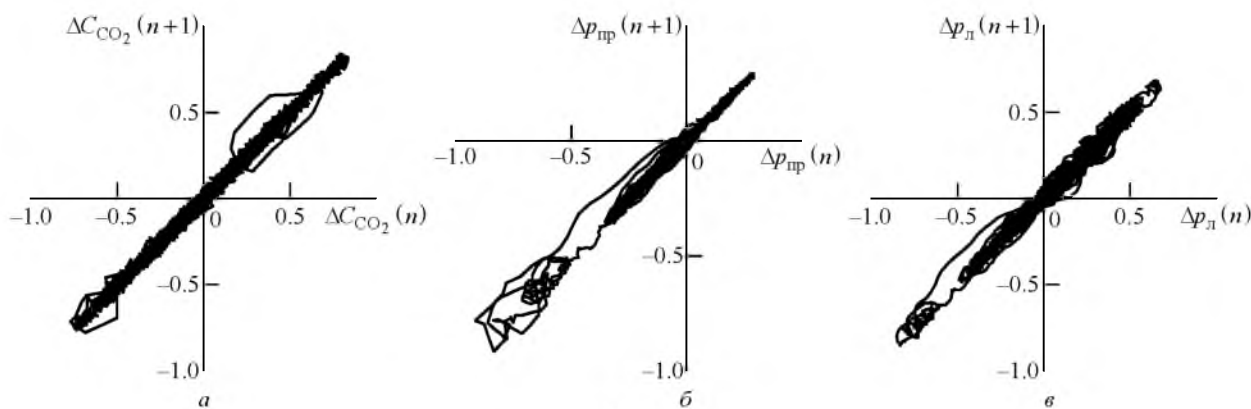


Рис. 4

| Ряды данных наблюдений | Параметр | | Ряды данных результатов моделирования | Параметр | |
|----------------------------------|----------|-------|---|----------|-------|
| | D_2 | K_2 | | D_2 | K_2 |
| Концентрация углекислого газа | 2.5 | 0.1 | Связь концентрации углекислого газа с давлением в правой ноздре | 2.3 | 0.21 |
| Давление воздуха в правой ноздре | 2.4 | 0.2 | | | |
| Давление воздуха в левой ноздре | 2.3 | 0.21 | Связь концентрации углекислого газа с давлением в левой ноздре | 1.99 | 0.23 |

Метод NARMAX также позволяет использовать фильтрацию модели синхронизации концентрации углекислого газа с давлением воздуха при вдохе и выдохе человека для разложения ее на независимые компоненты, т. е. данный метод может быть применен в качестве цифрового филь-

тра. Это позволяет применять его как для сжатого описания особенностей функционирования человеческого организма, так и для описания особенностей конкретного человека вне зависимости от местонахождения респондента.

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. А. Рассадина, О. А. Дранишникова и др. // 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 results of synchronous measurements of carbon dioxide concentration with air pressure at person breath and exhalation

Nonlinear dynamic modeling of results of synchronous measurements of carbon dioxide concentration with air pressure at person breath and exhalation by the Non Linear Auto-Regressive Moving Average with Exogenous Inputs method (NARMAX) is presented. Modeling connects of pressure change characteristics in the person breath course with the carbon dioxide concentration in the inhaled/exhaled air at synchronous measurement. Comparison of chaotic invariants of measurements results – correlation dimension and entropy – of carbon dioxide concentration with air pressure at person breath exhalation with the presented model.

Nonlinear dynamic modeling, NARMAX, carbon dioxide concentration, air pressure, synchronization, correlation dimension, correlation entropy

Статья поступила в редакцию 8 июня 2015 г.