УДК 531.19

Ю.П. Мачехин

Харьковский национальный университет радиоэлектроники, Харьков

БАЗОВЫЕ ПРИНЦИПЫ ИЗМЕРЕНИЯ НЕИЗМЕРЯЕМОГО

В настоящей работе была поставлена задача поиска условий, при которых можно осуществлять измерения в саморегулируемых системах. Именно в таких системах существует режим, когда за конечное время система восстанавливает свое устойчивое состояние, после того как на нее воздействовало возмущение. В работе показано, что, основываясь на качественной теории дифференциальных уравнений, которая позволяет описать характер поведения нелинейных динамических систем, можно построить теорию измерения тех величин, для которых явного математического описания нет

Ключевые слова: *нелинейные динамические системы, устойчивое состояние, время возвращения*

Введение

Работая над предвидением и предсказанием научных и технологических потребностей, метрология и теория измерений развивает основные принципы методик выполнения и анализа результатов измерений величин, для которых пока не существует необходимой физической и математической модели описания. К таким величинам можно отнести здоровье, настроение и многие другие характеристики состояния человека. В этой связи, несколько лет назад в рамках 6 рамочной программы Евросоюза была объявлена инициатива NEST (новая возникающая наука и технология) направленная на решение задач, связанных с измерением невозможного. Предлагалось подавать проекты, в рамках которых должны были решаться таких вопросы как разработка методик измерения здоровья, настроения и уверенности человека, а также другие формы эмоционального восприятия, например, – как человек реагирует на запах новой машины.

В метрологии применение принципа классического, лапласовского детерминизма носит ясный характер, что дает возможность устанавливать однозначную связь между измеряемыми величинами и параметрами системы [1]. Поэтому неопределенность результата косвенных измерений в полной мере определяется точностью задания или определения начальных условий. Общий подход к представлению результата измерений как характеристики стабильного и устойчивого состояния исследуемой системы, является основой современной теории измерений.

Реалии современного развития науки, технологий, медицины, экономики и многих других направлений общественного развития, как было отмечено выше, проявляют интерес к тем процессам, которые развиваются в условиях нелинейных динамических систем и в первую очередь в системах с саморегулированием. В последнее время [2 – 5] была предпринята попытка развить теорию измерений в нелинейных динамических системах с хаотической динамикой. Было показано, что собственная динамика (хаотическая) поведения этих систем существенным образом влияет на результаты и на неопределенность измерений параметров или переменных системы. В настоящей работе, была поставлена задача поиска условий, при которых можно осуществлять измерения в саморегулируемых системах. Именно в таких системах существует режим, когда за конечное время система восстанавливает свое устойчивое состояние, после того как на нее воздействовало возмущение. В работе показано, что, основываясь на качественной теории дифференциальных уравнений, которая позволяет описать характер поведения нелинейных динамических систем, можно построить теорию измерения тех величин, для которых явного математического описания нет. Поэтому, целью настоящей работы был анализ условий, при которых можно сформулировать измерительную задачу тех величин, которые не имеют меры, но которые используют для качественной характеристики процессов в саморегулируемой динамической системе.

Основная часть

Математические основы измерений в саморегулируемой динамической системе

Стабильность значения результата измерений обусловлена временным поведением исследуемой системы и влиянием внешних флуктуаций на нее. Главное, что результат измерений и неопределенность измерений характеризуют стабильное состояние системы, а все временные процессы, влияющие на состояние системы, приводят к увеличению неопределенности измерений. Измерения позволяют установить значения параметров, которые характеризуют стабильное и устойчивое состояние системы. Существуют динамические измерения, которые выполнимы в условиях временной детерминированной зависимости поведения системы. Однако, оценка качества результатов динамических измерений осуществляется с использованием существующих методических рекомендаций и теоретических положений. В любом случае результат измерений не связан с переходными процессами. Но есть условия, при которых именно переходные процессы характеризуют определенные процессы или состояния.

Почему представляют интерес измерения в саморегулируемой системе? В первую очередь потому, что такие системы описывают работу живых организмов. Если будет развита теория измерений для саморегулируемых систем, то появится возможность выполнять измерения и анализировать такие величины как, например, здоровье человека. Описать работу саморегулируемой системы можно с помощью качественной теории дифференциальных уравнений и в первую очередь используя особенности поведения системы вблизи устойчивых точек.

Качественная теория дифференциальных уравнений, как математическая основа теории нелинейных динамических систем, позволяет изучать поведение системы в фазовом пространстве вблизи особых точек, к которым относятся: - устойчивый или неустойчивый узел; устойчивый и неустойчивый фокус; седло и окрестность обыкновенной точки. Кроме особых точек существуют устойчивые и неустойчивые периодические движения. Устойчивые состояния равновесия: узел или фокус, определяются по корням характеристического уравнения [6]. Таким образом, только в тех состояниях, для которых существуют отрицательные реальные части корней характеристического уравнения, в динамических системах может быть реализована задача измерений. Иначе, реальным, физически существующим состояниям динамической системы, соответствуют устойчивые особые точки и измерения проводятся в этих условиях. Однако, в работе идет речь не о измерении параметров системы, находящейся в устойчивом состоянии, а о измерении времени возвращения системы в устойчивое состояние.

Математическое описание n-мерных динамических систем вблизи точки устойчивости в фазовом пространстве основано на качественном анализе решения системы n дифференциальных уравнений

$$\frac{\partial}{\partial t} X = f(X)\,, \tag{1}$$

где: $X = (X_1, X_2 ... X_n)$, $f = (f_1, f_2 ... f_n)$.

В устойчивом состоянии системы уравнение (1) перепишется, как $f(X^0) = 0$, что представляет собой уравнение для косвенных измерений. Поскольку под воздействием флуктуаций (как правило, эргодических) устойчивое состояние во времени «размазывается» на некоторую область в фазовом пространстве, то результаты измерений, выполняемые во временной последовательности, будут принадлежать этой области и уже в размазанной области найти саму устойчивую точку найти невозможно, можно только оценить ее местонахождение. Статистический разброс результатов многократных измерений формирует неопределенность типа А. Неопределенность типа В связана со сдвигом результата измерений относительно положения точки устойчивости в фазовом пространстве.

Если рассматривать решение (1) в фазовом пространстве вблизи устойчивых, притягивающих точек (аттракторов), то поведение системы в этой области описывается уравнением

$$\frac{\partial}{\partial t}(X) = f(X^0) + \frac{\partial f}{\partial X}\,. \tag{2}$$

Возвращение в устойчивое состояние системы будет происходить в соответствии с экспоненциальным законом

$$X \approx \exp(-\lambda t)\,. \tag{3}$$

Если на систему оказало воздействие возмущение, то система обратно возвращается в устойчивое состояние за время t=1/л.

Используя качественную теорию описания поведения переменных системы дифференциальных уравнений для описания условий измерений, следует учесть, что фазовое пространство может быть не только двумерным, но и трехмерным и более. В том случае, когда размерность больше двух, то устойчивые состояния могут представлять собой не только особые устойчивые точки (в пространстве), но и устойчивые, притягивающие области. Некоторые из таких областей в современной математике и физике получили название странные аттракторы (strange attractor) [7]. Поскольку странный аттрактор представляет собой притягивающее множество, то система, выведенная из первоначального состояния, возвращается в исходное состояние в соответствии с (3).

Ранее в работах рассматривались вопросы, как оценивать результаты измерений в условиях поведения нелинейной динамической системы. Основным условием, при котором выполняются измерения, является стационарное устойчивое состояние динамической системы, представляющее собой простой аттрактор. Если на систему, находящуюся в состоянии простого аттрактора воздействуют внешние случайные флуктуации, то результаты многократных измерений обрабатываются с помощью статистических методов [8].

Интерес представляет другой случай, когда на систему оказывает кратковременное (импульсное) нормированное воздействие. Система под воздействием этого возмущения уходит из устойчивого состояния, после чего, за счет свойств самой системы, она возвращается в течение времени, определяемого показателем Ляпунова. Чем быстрее система возвращается в устойчивое состояние, тем сильнее восстановительные функции системы. Каждое из устойчивых состояний имеет область притяжения, таким образом, что если система за счет внешнего воздействия покидает устойчивое состояние, то, оставаясь в зоне притяжения, она за конечное время возвращается обратно в устойчивое состояние. Время возвращения системы в устойчивое состояние определяется через показатель Ляпунова. Поэтому, если время возвращения в стационарное устойчивое состояние изменяется, значит, изменился показатель Ляпунова, который в общем случае характеризуется системой в целом. Свойство системы возвращаться в исходное состояние после того, как на нее повлияло возмущение, представляет собой процесс саморегулирования.

В общем случае биофизическое состояние человека представляет собой аттрактор, на который воздействуют внешние случайные или периодические возмущения. Если принять модель, что здоровье характеризует устойчивость организма (хотя может быть и другая модель здоровья), то для количественной оценки здоровья необходимо измерить время восстановления устойчивого состояния. Основываясь на рассмотренном методе измерения времени восстановления состояния динамической системы, в настоящей работе проанализированы условия измерения устойчивости биофизического состояние человека, которое характеризуется как здоровье человека. Не обсуждая возможность описания состояния биологической системы на основе простого аттрактора, или на основе странного аттрактора, то для процесса измерений представляет интерес скорость возвращения системы в устойчивое состояние. Поэтому здоровье, как характеристика состояния человека, связана с динамическим процессом и, следовательно, может характеризоваться результатом измерения времени восстановления первоначальных значений параметров, характеризующих состояние организма. Если считать, что здоровье позволяет восстанавливать устойчивое состояние, то для измерения величины здоровья необходимо обеспечить воздействие на систему нормированного воздействия, после чего осуществляется измерение времени восстановления устойчивого состояния.

Выводы

Таким образом, рассмотренный в настоящей работе пример можно обобщить и сформулировать новый подход к построению измерительной схемы в условиях нелинейных динамических систем. Величины, которыми мы пользуемся при оценке качества таких систем, как правило, не имеют меры (здоровье, чувства и т.д.), т.е. проводить прямые измерения этих величин невозможно. Кроме этих величин, которыми оценивают или описывают состояние систем, всегда существуют такие физические величины, характеризующие состояние той же системы, изменение которых сопровождает восприятие изменения нефизических величин. Когда интересующая величина не имеет единицы измерений, но ее надо оценить, то можно построить такую измерительную схему, в которой измеряется, например, время и через измеренный интервал времени оценивается искомая величина. Главная задача, найти связь между исследуемыми процессами и измеряемой величиной. Если исследуется динамическая система, то, конечно, основным параметром может выступать время. Впервые характеризуется временем возвращения в устойчивое состояние, то представления описано это не устойчивое состояние, а время, в течение которого система возвращается к устойчивому состоянию. Если такую модель принять как рабочую, то измеряя время возращения системы в устойчивое состояние можно оценивать состояние здоровья человека. Сложность подобного подхода заключается в том, что в реальных условиях устойчивым состоянием может быть странный аттрактор, тогда экспериментально зафиксировать время возвращения в устойчивое состояние потребует длительного времени наблюдения. Экспериментальная медицина уже давно применяет способ оценки состояния здоровья по времени возвращения в нормальное состояние после физических нагрузок.

Список литературы

1. BIPM, IEC, IFCC, ISO, IUPAC, IUPAP and OIML, 1995 Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement, 2nd edn., ISBN 92-67-10188-9.

2. Machekhin Yu. P. Time series fractal dimension analisys in the problem of measurement results treatment / Yu. P. Machekhin // XIII IMEKO Wold congress "-1994.-Torino, Italy "From mesurement to innovation.

3. Machekhin Yu. P. Effects of chaotic dynamic-system behavior on measurement uncertainty / Yu. P. Machekhin. – Measurement Techniques, Springer New York, 51, N1, 2008. – Pp. 6 – 10.

4. Machekhin Yu.P. Uncertainty measurement and dynamic system chaotical behaviour / Yu.P. Machekhin. – 12th IMECO TC1&TC7 Joint Symposium on Man Science & Measurement September, 3-5, 2008, Annecy, France.

5. Machekhin Yu. P. Fractal scale for time series of the results of measurements / Yu.P. Machekhin. // Measurement Techniques Volume 52. – 2009. – №8. – Pp. 835-838.

6. РМГ 29 – 99. Основные термины и определения. // Сборник нормативно –правовых актов Украины и организационно-методических документов по вопросам метрологии. – Киев, 2002. – С. 195-247.

7. Schuster H. Deterministic chaos / H. Schuster. – Physik-Verlag Weinheim, 1984. – 240 p.

8. Новицкий П.В. Оценка погрешностей результатов измерений / П.В. Новицкий, И.А. Зограф. – Ленинград: Энергоатомиздат, 1991. – 301 с.

Поступила в редколлегию 7.02.2013

Рецензент: д-р техн. наук, проф. И.П. Захаров, Харьковский национальный университет радиоэлектроники.

БАЗОВІ ПРИНЦИПИ ВИМІРЮВАННЯ НЕВИМІРЮВАНОГО

Ю.П. Мачехін

У цій роботі було поставлено завдання пошуку умов, при яких можна здійснювати вимірювання в саморегулівних системах. Саме у таких системах існує режим, коли за кінцевий час система відновлює свій стійкий стан, після того, як на неї впливало збурення. У роботі показано, що, ґрунтуючись на якісній теорії диференціальних рівнянь, яка дозволяє описати характер поведінки нелінійних динамічних систем, можна побудувати теорію вимірювань тих величин, для котрих немає явного математичного опису.

Ключові слова: *нелінійні динамічні системи, стійкий стан, час повернення.*

BASICS PRINCIPS OF UNMEASUREABLE MEASURING

Yu. P. Machekhin

In this work the problem of searching the conditions when it's possible to carry out measurements in self-regulating systems, is set. In such systems there is a mode when for final time the system restores the steady condition after it was influenced by disturbance. The paper shows that it's possible to construct the theory of measurement for quantities without mathematical description using the qualitative theory of the differential equations which allows to describe nature of nonlinear dynamic systems behavior.

Keywords: *nonlinear dynamic systems, stable state, time of returning.*