

Вимірюйте
усе доступне вимірюванню
й робіть недоступне вимірюванню
доступним.

Галілео Галілей

ISSN 2307-2180

Метрологія



Та прилади

№ 1 (69), 2018

Науково-виробничий журнал

Засновники:

Академія метрології України,
Харківський національний
університет радіоелектроніки (ХНУРЕ),
Державне підприємство
«Всеукраїнський державний
науково-виробничий центр
стандартизації, метрології, сертифікації
та захисту прав споживачів»
(ДП «Укрметрестандарт»),
ТОВ Виробничо-комерційна
фірма «Фавор ЛТД»

Видається з березня 2006 року
Рік випуску тринадцятий
Передплатний індекс 92386

Редакційна колегія:

Большаков В. Б., д. т. н., с. н. с.
Варша З., д. т. н., Польща
Величко О. М., д. т. н., проф.
Віткін Л. М., д. т. н., проф.
Грищенко Т. Г., д. т. н., с. н. с.
Гудрун В., д. т. н., Німеччина
Жагора М. А., д. т. н., проф., Білорусь
Захаров І. П., д. т. н., проф.
Зенкін А. С., д. т. н., проф.
Коломієць Л. В., д. т. н., проф.
Косач Н. І., д. т. н., проф.
Кошева Л. О., д. т. н., проф.
Крюков О. М., д. т. н., проф.
Кузьменко Ю. В., к. т. н.
Кухарчук В. В., д. т. н., проф.
Мачехін Ю. П., д. т. н., проф.
Назаренко Л. А., д. т. н., проф.
Народницький Г. Ю., д. т. н., с. н. с.
Неежмаков П. І., д. т. н. доц.
Петришин І. С., д. т. н., проф.
Пістун Є. П., д. т. н., проф.
Радев Х., д. т. н., проф., Болгарія
Рожнов М. С., к. х. н., с. н. с.
Руженцев І. В., д. т. н., проф.
Самойленко О. М., д. т. н., проф.
Скубіс Т., д. т. н., проф., Польща
Сурду М. М., д. т. н., проф.
Туз Ю. М., д. т. н., проф.
Хакімов О., д. т. н., проф., Узбекистан
Чалий В. П., к. т. н., с. н. с.
Черепков С. Т., к. т. н. доц.
Чуновкіна А. Г., д. т. н., Росія

Редакційна група:

Головний редактор д. т. н., проф.
Володарський Є. Т.,
Заступник головного редактора
Фісун В. П.
Науковий редактор — відповідальний
секретар Винокуров Л. І.
Дизайнер-верстальник Зайцев Ю. О.

Журнал **рекомендовано до друку**
вченою радою ХНУРЕ
(протокол №3 від 23.02.2018)

Адреса редакції:

61002, Харків, вул. Куликівська, 11;
Тел.: (057) 706-00-36; (095) 00-68-665
E-mail: metrolog-prylady@ukr.net
<http://www.amu.in.ua/journal1>

Видавець та виготовлювач:

ВКФ «Фавор ЛТД»
61140, Харків, пр-т. Гагаріна, 94-А, кв. 35;
Свідоцтво про внесення
до Держреєстру видавців,
виготівників і розповсюджувачів
видавничої продукції
серія ХК № 90 від 17.12.2003.

Підписано до друку 07.03.2018.
Формат 60×84/8. Папір крейдований.
Ум. друк. арк. 8,43. Обл.-вид. арк. 7,13.
Друк офсетний. Тираж 400 прим.
Замовлення № 7.

© «Метрологія та прилади», 2017

Журнал зареєстровано
у Міністерстві юстиції України,
свідоцтво
серія КВ № 22796-12696ПР
від 03.07.2017;
включено до Переліку наукових
фахових видань України, наказ
Міністерства освіти і науки України
№ 747 від 13.07.2015

Журнал включено до Міжнародної
наукометричної бази даних
Index Copernicus, лист від 08.03.2013

МЕТРОЛОГІЧНОМУ ЦЕНТРУ ВІЙСЬКОВИХ ЕТАЛОНІВ ЗБРОЙНИХ СИЛ УКРАЇНИ — 25 РОКІВ

Історична довідка:

1992 р. — при Харківському військовому університеті (ХВУ) створено Військовий науково-метрологічний центр (ВНМЦ ХВУ) — головну науково-дослідну організацію у ЗС України з проблем метрологічного забезпечення військ (сил).

1993 р. — в структурі ЗС України створено Центральну базу військових еталонів ЗС України.

1996 р. — шляхом переформування і об'єднання ВНМЦ ХВУ та Центральної бази створено Науковий метрологічний центр (військових еталонів) — НМЦ (ВЕ).

2006 р. — шляхом переформування НМЦ (ВЕ) створено Метрологічний центр військових еталонів Збройних Сил України (МЦВЕ ЗС України).

Метрологічний центр військових еталонів Збройних Сил України входить до складу метрологічної служби МО України та ЗС України і є головною організацією з військово-метрологічного супроводження озброєння і військової техніки на всіх етапах і стадіях його життєвого циклу, проведення метрологічної експертизи документації на озброєння і військову техніку.

Згідно з нормативно-правовими документами, одними з основних завдань МЦВЕ ЗС України є:

- науково-технічне забезпечення зберігання, експлуатації, дослідження та удосконалення вихідних еталонів ЗС України та супроводження створення, розробки та експлуатації вимірювальної техніки військового призначення;
- забезпечення функціонування у ЗС України служби єдиного часу та еталонних частот;
- метрологічне забезпечення геодезичних робіт у сферах діяльності МО України та ЗС України;
- розробка проекту концепції розвитку системи метрологічного забезпечення діяльності у сфері оборони, загальних напрямів військово-технічної політики у галузі метрологічного забезпечення;
- організація, проведення та контроль виконання комплексу науково-методичних, організаційних та технічних заходів, спрямованих на досягнення єдності вимірювань, своєчасності і достовірності контролю параметрів об'єктів військового призначення та частотно-часового простору;
- виконання функції регіональної метрологічної частини, призначеної для метрологічного обслуговування військ (сил) у закріпленому регіоні, — головної організації з метрологічного забезпечення у регіоні.

МЦВЕ Збройних Сил України продовжує успішно розв'язувати проблеми розвитку та удосконалення систем і засобів метрологічного забезпечення озброєння і військової техніки, повноти та якості виконання робіт, ефективності впровадження результатів досліджень і практичних розробок, якості науково-виробничої та еталонної бази. Діяльність МЦВЕ Збройних Сил України, створеного на базі НМЦ (ВЕ), спрямована в тому числі на забезпечення стабільності метрологічних характеристик вихідних еталонів військового призначення, необхідного рівня точності відтворення одиниць фізичних величин і передачі їх розмірів робочим еталонам військового призначення.

**О. ДЗИСЮК, начальник Метрологічного центру
військових еталонів Збройних Сил України**

ТЕНДЕНЦІЇ ТА ПЕРСПЕКТИВИ РОЗВИТКУ	TRENDS AND PROSPECTS FOR DEVELOPMENT
Віткін Л. Аналіз системи технічного регулювання, стандартизації, метрології в Україні та заходи щодо її удосконалення на 2018 рік 3	Vitkin L. Analysis of technical regulation, standardization, metrology in Ukraine and measures for its improvement in 2018
Попруга Ю. Департамент технічного регулювання Міністерства економічного розвитку і торгівлі України: підсумки метрологічної діяльності за 2017 рік 8	Popruga Yu. Technical Regulation Department of the Ministry of Economic Development and Trade of Ukraine: Metrological activities in 2017
ЗАКОНОДАВЧА МЕТРОЛОГІЯ	LEGAL METROLOGY
Кузьменко Ю., Черепков С., Дуля В. Оцінка відповідності засобів вимірювальної техніки — реалізація в Україні європейських підходів (принципів)..... 11	Kuzmenko Yu., Cherepkov S., Dulya V. Assessment of the Conformity of Means of Measuring Equipment — Realization in Ukraine of European Approaches (principles)
МЕТОДИ ТА ЗАСОБИ	METHODS AND MEANS
Воробйов Л. Методи та засоби квазідиференціальної калориметрії 17	Vorobiov L. Methods and Means of Quasi-Differential Calorimetry
ВИМІРЮВАННЯ ТА ВИПРОБУВАННЯ	MEASUREMENT AND TESTS
Івашченко А., Микитчик П., Гайдай В., Свита М., Купчинський В. Застосування усереднювальних напірних трубок за вимірювання швидкості та витрати газу 26	Ivashchenko A., Mykytchik P., Gaidai V., Svyta M., Kupchynskii V. Application of Averaging Multi-Hole Pressure Probes in Gas Flow Velocity and Volume Gas Flowrate Measurements
ПОХИБКИ ТА НЕВИЗНАЧЕНОСТІ	ERRORS AND UNCERTAINTY
Сурду Д. О вычисления неопределенности измерений импеданса сложными системами 31	Surdu M. About computation of uncertainty of measurement of impedance by complex systems
ЯКІСТЬ ТА ЕФЕКТИВНІСТЬ	QUALITY AND EFFICIENCY
Кошева Л., Клевцова М. Обобщенный подход к оцениванию статистической управляемости технологического процесса. Часть 1. Статистическое обоснование критериев разлаженности технологического процесса 40	Kosheva L., Klevtsova M. Generalized Approach to the Estimation of Statistical Controllability of the Technological Process. Part 1. Statistical Justification of the Criteria of Technological Process Dysfunction
ТЕХНІЧНА ДІАГНОСТИКА	TECHNICAL DIAGNOSTICS
Орнатський Д., Довгань В. Дослідження параметрів N-канальних фільтрів для вібраційного аналізу підшипникових частот 46	Ornatskiy D., Dovgan V. Investigation of Parameters of N-Channel Filters for Vibration Analysis of Bearing Frequencies
ЗАСТОСУВАННЯ ТА ЕКСПЛУАТАЦІЯ	APPLICATION AND EXPLOITATION
Ключник І., Мамонтов О., Умяров Р., Шалаєва В. Методи оптимального комплектування роторів модульного типу в процесі складання..... 53	Kliuchnik I., Mamontov A., Umiarov R., Shalayeva V. Methods of Modular Type Rotors Optimal Complexing in the Process of the Composition
НЕЛІНІЙНА МЕТРОЛОГІЯ	NONLINEAR METROLOGY
Мачехин Ю., Курской Ю. Составление модели измерений в нелинейных динамических системах..... 58	Machekhin Yu., Kurskoy Yu. Creation the measurement model for nonlinear dynamical systems
ОЦІНЮВАННЯ КОМПЕТЕНТНОСТІ	ASSESSMENT OF COMPETENCE
Величко О., Гордієнко Т. Аналіз шкали для оцінювання компетентності експертів з метрології із застосуванням моделі Раша 63	Velychko O., Gordiyenko T. Analysis of the Scale for Evaluating the Competence of Experts on Metrology Using the Rusch Model
ПІДГОТОВКА ФАХІВЦІВ	TRAINING EXPERTS
Новіков В., Никитюк О. Навчально-методичне забезпечення процесу акредитації органів з оцінки відповідності в Україні 69	Novikov V., Nykytyuk O. Scientific Assurance of the accreditation process in Ukraine
ІНФОРМАЦІЯ 1	INFORMATION

006.91:053.088

СОСТАВЛЕНИЕ МОДЕЛИ ИЗМЕРЕНИЙ В НЕЛИНЕЙНЫХ ДИНАМИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

**Creation the measurement model
for nonlinear dynamical systems**

Ю. Мачехин, доктор технических наук, профессор,
заведующий кафедрой фотоники
и лазерной инженерии,
e-mail: yurii.machekhin@nure.ua

Ю. Курской, кандидат технических наук,
доцент кафедры,
Харьковский национальный университет
радиоэлектроники,
e-mail: yurii.kurskyi@nure.ua

Yu. Machekhin, Doctor of Technical Science, Professor,
Head of Photonics
and Laser Engineering Department,
e-mail: yurii.machekhin@nure.ua

Yu. Kurskoy, Candidate of Technical Science,
Associate Professor of Department,
Kharkov National University
of Radioelectronics,
e-mail: yurii.kurskyi@nure.ua

Выполнена классификация динамических систем как объектов измерения. Показано, что наиболее сложными для измерения и анализа результатов являются нелинейные динамические системы. Предложены принципы построения модели измерения для таких систем. Традиционное модельное уравнение дополнено зависимостью от времени входных величин и шумов, а также начальными значениями входных величин, функциями их эволюции и временем предсказания. Для случая диссипативных систем предложено использовать портрет измерения, который представляет собой графическое и численное отображение результатов измерения и является объектом анализа и получения данных о системе и результатах измерения.

The classification of dynamical systems as the measurement objects are made in the article. It is shown that the most difficult for measurement and results analyze are nonlinear dynamical systems. The principles of creation the measurement model for such systems are proposed. The traditional model equation was complemented with the time dependence of the input variables and noise, and also the initial values of the input quantities, functions of their evolution and prediction time. For the case of dissipative system is proposed to use the measurement portrait, which is a graphic and numerical display of measurement results. The portrait is a subject for analysis. It can give an information about the system and measurement results.

Ключевые слова: нелинейная динамическая система, модель измерения, портрет измерения.
Keywords: nonlinear dynamical system, measurement model, measurement portrait.

В июне 2017 года Техническим комитетом 1.1 СООМЕТ «Общие вопросы измерений» принято решение о выполнении темы, направленной на разработку нормативного документа по обоснованию модельного уравнения при оценивании неопределенности измерения (693/UA-a/16). В рамках темы планируется разработать рекомендации для составления модели измерения (МИ) в нелинейных динамических системах. По результатам работы будет предложена модель, которая может стать основой Рекомендации СООМЕТ [1].

МИ является необходимым элементом для определения величины неопределённости измерения. Она также используется для установления точности измерения в условиях динамической неравновесной системы. Разработка МИ представляет собой задачу, которая в первую очередь должна установить математическую связь между входными величинами (X_1, X_2, \dots, X_n), среди которых как измеряемые величины, так и константы, и выходными величинами (величиной) Y [2]:

$$Y = f(X_1, X_2, \dots, X_n). \quad (1)$$

Степень сложности математического представления (1) зависит от динамических процессов, количества входных величин и их взаимосвязи, а также от учёта влияния шумов на результат измерения. При этом к наиболее сложным задачам



Ю. Мачехин



Ю. Курской

относится задача математического описания нелинейных процессов.

Вопросам измерений и оценки результатов измерений переменных величин в нелинейных динамических системах посвящена монография «Нелинейная метрология» [3]. В ней предложено теоретическое обоснование необходимости принципиально нового подхода для измерения и оценки результатов измерений величин в системах со сложной, часто хаотичной, динамикой, представлены модели анализа результатов измерения и математические инструменты анализа динамических переменных (ДП) нелинейных динамических систем (НДС).

Некоторые проблемы обоснования МИ при оценивании неопределенности измерений рассмотрены в работе [4], где приведены категории моделей, сделан акцент на проверке их адекватности и необходимости отдельного рассмотрения динамических МИ.

Цель настоящей работы — классификация динамических систем как объектов измерения, выделение основных свойств нелинейных динамических систем и представление принципов составления модели измерения в нелинейных динамических системах.

1. КЛАССИФИКАЦИЯ ДИНАМИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Первым шагом к созданию МИ является исследование свойств и классификация моделируемых объектов и процессов. Под динамической системой понимают любой объект или процесс, для которого однозначно определено понятие состояния как совокупности значений некоторых величин $[X_1(t), \dots, X_n(t)]$ в момент времени t , и задан закон $F(X, t)$, описывающий эволюцию начального состояния $[X_1(t_0), \dots, X_n(t_0)]$ с течением времени:

$$F[X_1(t_0), \dots, X_n(t_0)] \rightarrow [X_1(t), \dots, X_n(t)]. \quad (2)$$

Такая система может быть описана обыкновенными дифференциальными уравнениями вида:

$$\frac{dX_i(t)}{dt} = F[X_1(t), \dots, X_n(t)]. \quad (3)$$

Под динамическими системами подразумеваются системы любой природы: физические, химические, биологические, социумы и популяции, экосистемы, а также финансовые рынки, вычислительные процессы и процессы преобразования информации [5]. Классификация этих систем может быть проведена на основе их топологических свойств: системы могут обладать устойчивыми состояниями при некоторых значениях переменных, характеризоваться неустойчивыми состояниями, такими как седло,

неустойчивый центр и неустойчивый фокус. Кроме этих, хорошо известных топологических особенностей, есть возможность формирования в таких системах хаотических динамических режимов.

Классификацию систем можно выполнить по экспериментально регистрируемым признакам:

- характеру динамики — детерминированные и стохастические, линейные и нелинейные;
- взаимодействию с внешней средой — открытые и закрытые;
- возможности обменом информацией и энергией — консервативные и диссипативные;
- характеру изменения состояния — непрерывные и дискретные;
- возможности самоорганизации — эволюционирующие и нет.

Рассмотрим основные черты приведенных систем. Так, детерминированными называются системы, ДП которых изменяются с течением времени по строго определенному закону $F(X, t)$. Стохастические системы характеризуются случайным характером поведения ДП, значения которых могут быть описаны математическим аппаратом теории вероятности. Линейные системы — это системы с линейным или линеаризованным законом эволюции $F(X, t)$. Нелинейная динамическая система — это динамическая система, закон эволюции которой $F(X, t)$ не может быть описан линейным или линеаризованным уравнением, то есть значения её ДП изменяются с течением времени нелинейным образом.

Открытые системы, согласно И. Пригожину, — это системы, через которые могут протекать потоки энергии и энтропии [6]. При достаточно больших потоках в таких системах могут проходить процессы нелинейной самоорганизации (эволюции). Они характеризуются спонтанным появлением сложной, зачастую хаотичной структурой временного или пространственного поведения системы.

Консервативные системы — это системы с сохранением энергии. Теоретически доказана возможность формирования в таких системах хаотических режимов поведения.

Диссипативные системы — это открытые системы, которые находятся вдали от состояния термодинамического равновесия и характеризуются возможностью диссипации (рассеивания) энергии, поступающей извне, спонтанным появлением сложной, зачастую хаотичной структуры. Примерами таких систем могут служить: биологический организм, например, человек, лазер, океан, социум, экосистема и другие объекты исследования.

Все перечисленные объекты представляют большой интерес для исследователей и социума. При этом хаотические процессы в диссипативных НДС — это одна из фундаментальных задач современного естествознания и являются объектами пристального внимания исследователей. Динамические переменные таких систем должны быть корректно измерены с применением моделей измерения и подходов, в максимальной степени соответствующих свойствам и процессам в них протекающим. Регистрация результатов измерений осуществляется в виде дискретного набора данных, в которых на случайный разброс результатов измерений накладывается регулярное или нерегулярное поведение самой системы. Корректное измерение ДП таких НДС служит не только условием оценки их текущего состояния, но и позволит делать прогнозы и управлять системами.

Каждый класс систем при построении МИ нуждается в индивидуальном подходе, но заметим, что все НДС можно объединить в две группы консервативных и диссипативных систем. Диссипативные системы обладают широким спектром свойств. При этом понятие консервативной и изолированной системы является в большинстве случаев идеализированным. Полностью исключить влияние внешних факторов на систему, равно как и обмен информацией и энергией, практически невозможно.

2. ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ НДС

Анализ публикаций, посвящённых исследованию класса интересующих нас систем ([5]—[7] и др.), позволяет выделить основные характеристики и свойства НДС.

Состояние НДС в момент времени t характеризуется n -мерным вектором состояния $X[X_1(t), \dots, X_n(t)]$, где $X_i(t)$ — i -я ДП. С течением времени значение $X_i(t)$ *изменяется, но находится в интервале* $X_i^{\min} \leq X_i \leq X_i^{\max}$. Этот интервал обусловлен возможностями функционирования системы. Выход значения ДП за его пределы означает разрушение системы.

Динамика ДП носит сложный, нелинейный характер. У систем есть неустойчивые состояния равновесия. Диссипативные системы обмениваются энергией и информацией с окружающей средой и иными системами, консервативные — нет.

ДП подвержены влиянию внешних факторов. Некоторые из них имеют критический для системы характер, способный изменить динамику ДП. Некоторые из ДП являются управляющими параметрами, изменение которых до определённых значе-

ний ведёт к фазовым переходам. В ходе фазовых переходов ДП могут изменять динамику от случайной до регулярной, хаотичной и наоборот.

Фазовый портрет диссипативной НДС в состоянии хаоса представляет собой пространственно-временную структуру — странный аттрактор. Фазовый объём консервативной системы сохраняется. Системы могут эволюционировать, некоторые системы обладают функцией самоорганизации.

И наконец, входные величины $X_i(t)$ НДС не всегда могут быть представлены случайными величинами. Как правило, они связаны между собой и подвержены влиянию извне даже слабых флуктуаций. Заметим, что входные величины в GUM ассоциируются со случайными величинами [8]. Эти и другие несоответствия подходов и положений GUM основным свойствам НДС рассмотрены в работе [9].

3. МОДЕЛЬ ИЗМЕРЕНИЯ

Измерение ДП НДС и обработку их результатов можно охарактеризовать как многофакторный эксперимент. Согласно [10] «...обработка результатов измерений, получаемых при многофакторном эксперименте, имеет целью получение основополагающих научных данных в виде неизвестных ранее математических моделей и их интерпретацию, а отнюдь не сводится к простому вычислению \bar{X} , σ_{X_i} или $\sigma_{\bar{X}}$ ». МИ ДП НДС должна рассматриваться не только как инструмент расчёта неопределённости измерения, но и как инструмент анализа её состояния и динамики, прогноза значений ДП.

Поэтому МИ НДС должна описывать не только связь входных величин с выходной, как в уравнении (1), но и эволюцию величин во времени:

$$Y(t) = f\{F[X_1(t), \dots, X_n(t)], (Z_1, \dots, Z_n), t\}$$

В эту МИ, кроме ДП, введены Z_1, \dots, Z_n — константы и величины, значения которых с течением времени измерений остаются постоянными.

В МИ должны быть учтены и другие факторы. Поскольку НДС подвержены влиянию шумов, то они, как процесс $\psi(t)$, должны быть включены в МИ. Поскольку отдельные входные величины являются ДП, для них должны быть найдены функциональные зависимости от времени $X_1(t), \dots, X_n(t)$. Сильная зависимость НДС от начальных условий требует учёта в МИ начальных условий $[X_1(t_0), \dots, X_n(t_0)], \psi(t_0)$. Хаотичная динамика и экспоненциальная расходимость траекторий фазового портрета НДС позволяет утверждать, что корректность МИ будет ограничена временем предсказания t_{for} . Время предсказания связано с показателем Ляпунова и рассчитывается методами анализа фазового портрета НДС [7].

В итоге МИ для НДС примет вид:

$$\left. \begin{aligned} Y(t) &= f\{F[X_1(t), \dots, X_N(t), (Z_1, \dots, Z_n), t] + \psi(t); \\ &X_1(t), \dots, X_n(t); \\ &[X_1(t_0), \dots, X_n(t_0)], \psi(t_0); \\ &t_{for} \cdot \end{aligned} \right\} (4)$$

Из выражения (4), на наш взгляд, самой сложной задачей является определение функции эволюции F . Знание F позволяет прогнозировать значение ДП в любой момент времени. При этом закон эволюции реальных недетерминированных НДС описать аналитически удаётся крайне редко [2]. Если же НДС является консервативной, то для её описания в ряде случаев применяются уравнения Гинзбурга-Ландау или Фокера-Планка [11].

4. НЕОПРЕДЕЛЁННОСТЬ ИЗМЕРЕНИЯ ПРИ НЕУСТОЙЧИВОЙ ДИНАМИКЕ

Большое количество приложений в измерительной технике ориентировано на измерение временных характеристик периодических процессов. Все измерения осуществляются, как правило, когда система находится в устойчивом состоянии — при любом возмущении система за конечное время возвращается в исходное состояние. Результат измерения соответствует действительному значению величины сколь угодно долго.

Второе состояние системы — это состояние, при котором случайное возмущение переводит систему из одного состояния в другое, при этом система может находиться в новом состоянии предельно долго, если на систему не повлияет новое возмущение. В этом случае также известные методы применимы, более того, именно с такой ситуацией чаще всего и сталкиваемся в процессе измерений в системах под действием внешнего или внутреннего шума, когда реальное состояние изменяется случайным образом и в таком состоянии остается в нем достаточно долго.

Третье возможное состояние динамической системы — это состояние, когда периодический регулярный процесс поведения системы изменяется на нерегулярный случайный режим отклонения от основного состояния. При этом нерегулярность поведения не связана с наличием внешних случайных возмущений, а только со свойствами самой динамической системы.

В этом случае со временем происходит экспоненциальное разбегание фазовых траекторий, и измеряемая величина (ДП) может принимать любое значение внутри аттрактора НДС (рисунок).

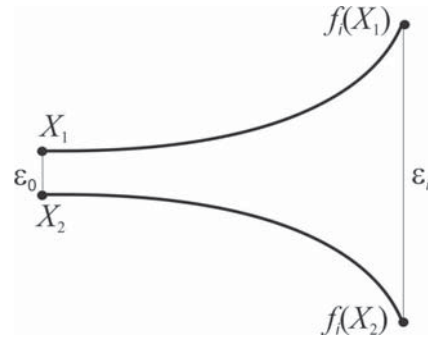


Рисунок. Экспоненциальное разбегание близких траекторий: ϵ_0, ϵ_i — расстояния между точками X_1, X_2 близких траекторий в моменты времени t_0 и t_i соответственно; $f_i(X_1), f_i(X_2)$ — отображения точек X_1, X_2 соответственно в момент времени t_i .

Figure. The exponential dispersal of close trajectories: ϵ_0, ϵ_i — the distances between X_1, X_2 points of close trajectories at t_0 and t_i moments respectively; $f_i(X_1), f_i(X_2)$ — the mappings of X_1, X_2 points respectively at t_i time.

Экспоненциальное разбегание близких траекторий: ϵ_0, ϵ_i — расстояния между точками X_1, X_2 близких траекторий в моменты времени t_0 и t_i соответственно; $f_i(X_1), f_i(X_2)$ — отображения точек X_1, X_2 соответственно в момент времени t_i .

При этом, если в момент измерения ДП X_i t_0 её действительное значение находилось в интервале $[y_i - u_i, y_i + u_i]$ (где y_i, u_i — оценка и неопределённость измерения X_i), то при развитии динамики и появлении странного аттрактора (хаотический режим) значение будет находиться в границах аттрактора $[y_{\min} - u_{\min}, y_{\max} + u_{\max}]$ (где $y_{\min}, y_{\max}, u_{\min}, u_{\max}$ — оценки и неопределённости измерения минимальных и максимальных значений X_i) по координате X_i :

$$[y_i - u_i, y_i + u_i] \in [y_{\min} - u_{\min}, y_{\max} + u_{\max}], \quad t \neq t_0. \quad (5)$$

Что в этом случае изменяется для задачи обработки результатов измерений? Дальнейшее, после момента времени t_0 , значение ДП становится предсказуемым в рамках интервала, обусловленного границами аттрактора (5).

5. ПОРТРЕТ ИЗМЕРЕНИЯ

В случае, когда математически описать процессы НДС невозможно, что в первую очередь касается диссипативных НДС, теория нелинейной метрологии предлагает использовать «портрет измерения» [12].

Портрет измерения — это графическое и численное отображение результатов измерения ДП НДС, представляющее собой расширенный фазовый портрет n измеренных ДП X_i и n кинетических портретов $X_i(t)$. При этом каждое значение X_i отображается при помощи результата измерения $x_i(t)$, с поправками на все известные систематические источники

неопределенности, и стандартной неопределенности $u_i(t_i)$.

Заметим, что n -мерный портрет измерения при $n > 3$ реализуется в n -мерном гильбертовом пространстве и может быть представлен в виде матрицы значений входных величин размерности $n \times m$, где m — количество измерений ДП в различные моменты времени, и матрицы размерности $1 \times n$ выходной величины $Y(t)$ с учётом расширенной неопределённости измерения i -го значения $U_i(t)$:

$$Y(t) = \begin{pmatrix} x_1(t_0) \pm u_1(t_0) & \dots & x_n(t_0) \pm u_n(t_0) \\ \dots & \dots & \dots \\ x_1(t_m) \pm u_1(t_m) & \dots & x_n(t_m) \pm u_n(t_m) \end{pmatrix},$$

$$Y(t) = \begin{pmatrix} y_1(t_0) \pm U_1(t_0) \\ \dots \\ y_n(t_n) \pm U_n(t_n) \end{pmatrix}. \quad (6)$$

Предлагаемая визуализация результатов измерения (6) позволяет получить дополнительную информацию о системе. Анализ портрета позволяет определить фрактальную размерность отдельной ДП X_i . Возможно сделать выводы о характере изменений ДП X_i и о связи их значений без знания аналитических решений исходной системы уравнений. Могут быть определены точки бифуркации и показатели Ляпунова, которые используются для анализа поведения системы в окрестностях отдель-

ной точки. Может быть определена размерность аттрактора и время прогноза динамики ДП t_{for} и другие данные.

ВЫВОДЫ


В работе выполнена классификация динамических систем как объектов измерения. Показано, что наиболее сложными для измерения и анализа результатов измерения являются нелинейные динамические системы.

Рассмотрены основные свойства таких систем, важные для составления модельного уравнения, такие как интервальность значений входных и выходных величин, хаотичная динамика и др.

Предложены принципы построения модели измерения. Традиционное модельное уравнение дополнено зависимостью от времени входных величин, шумов и выходной величины, а также начальными значениями входных величин, функциями их эволюции и временем предсказания.

Для случая, когда математическое описание процессов в диссипативных системах невозможно, предложено использовать портрет измерения, который представляет собой графическое и численное отображение результатов измерения и является объектом анализа и получения данных о системе и результатах измерения.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Соголасована тема КООМЕТ. Порядковий номер 693/UA-a/16/ Дата соголасования 12.06.2017. (Agreed theme of COOMET. Serial number 693/UA-a/16 / Date of agreement 12.06.2017).
2. JCGM 103. Evaluation of measurement data — Supplement 3 to the «Guide to the expression of uncertainty in measurement» — Developing and using measurement models.
3. Мачехин Ю.П., Курской Ю.С. Основы нелинейной метрологии /LAP Lambert Academic Publishing, 2014 . — 162 с. (Machekhin Yu.P., Kurskoy Yu.S. Basics of Nonlinear Metrology /LAP Lambert Academic Publishing, 2014. — 162 p.)
4. А.В. Прокопов, И.П. Захаров, О.А. Боцюра Основные проблемы обоснования модельного уравнения при оценивании неопределенности измерений // Український метрологічний журнал. — 2017 — №3. — 2016. — С. 19-22. (A.V. Prokopov, I.P. Zakharov, O.A. Botsyura The basic problems of justifying a model equation in estimating the measurement uncertainty // Ukrainian Metrological Journal — 2017 — № 3. — 2016. — Pp. 19—22)
5. Неймарк Ю. Динамические системы и управляемые процессы. / М.: Едиториал УРСС, 2010. — 336 с. (Neumark Yu. Dynamic Systems and Managed Processes. / Moscow: Editorial URSS, 2010. — 336 p.)
6. Николіс Г., Пригожин І. Самоорганізація в неравновесних системах. От диссипативних структур к упорядоченности через флуктуации. / М.: Мир, 1979. — 512 с. (Nikolis G., Prigogine I. Self-organization in non-equilibrium systems. From dissipative structures to ordering through fluctuations. / М.: Mir, 1979. — 512 p.)
7. Лоскутов В.Ю. Очарование хаоса. // УФН. — 2007. — С. 177—189. (Loskutov V.Yu. Charm of Chaos. // UFN. — 2007. — P. 177—189.)
8. Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement. Geneva: ISO, 1993.
9. Ю.П. Мачехин, Ю.С. Курской. Составление уравнения измерения энтропии Шеннона нелинейных динамических систем с использованием методов интервального анализа // Приборы и методы измерений. — 2015. — Т. 6, № 2. — С. 257—263. (Yu.P. Machekhin, Yu.S. Kurskoy. Formulation of the Shannon entropy measurement equation for nonlinear dynamical systems using the methods of interval analysis // Instruments and methods of measurements. — 2015. — V. 6, No. 2. — P. 257—263.)
10. Новицкий П.В., Зограф И.А. Оценка погрешностей результатов измерений / — Ленинград: Энергоатомиздат. 1991. — 304 с. (Novitsky P.V, Zograf I.A. Estimation of errors in measurement results / — Leningrad: Energoatomizdat. 1991. — 304 p.)
11. Г. Хакен. Синергетика / М.: Мир, 1980 — 405 с. (H. Haken Synergetics / М.: Mir, 1980 — 405 p.)
12. Yu. Machekhin, Yu. Kurskoy, E. Prisich The measurement portrait of dynamic variables // Метрологія та прилади. — 2016 — Вып. 05 (61). — С. 48—51. 

Отримано / received: 10.02.2018.

Стаття рекомендована до публікації д.ф.-м.н., проф. М. І. Дзюбенком (Україна).
Prof. M.I. Dzubenko, D. Sc. (Phys.-mat.), Ukraine, recommended this article to be published.