

## НАУКОВІ ДОСЛІДЖЕННЯ

УДК 519.21

DOI: 10.30838/J.BPSACEA.2312.250918.10.191

### ПУТИ ИДЕНТИФИКАЦИИ СЛОЖНЫХ СИСТЕМ

БОЛЬШАКОВ В. И.<sup>1</sup>, *д-р техн. наук, проф.*,

ВОЛЧУК В. Н.<sup>2</sup>, *д-р техн. наук, доц.*,

ДУБРОВ Ю. И.<sup>3</sup>, *д-р техн. наук, проф.*

<sup>1</sup>Кафедра материаловедения и обработки материалов, Государственное высшее учебное заведение «Приднепровская государственная академия строительства и архитектуры», ул. Чернышевского, 24-а, 49600, Днепро, Украина, тел. +38 (0562) 47-39-56, e-mail: bolshakov@mail.pgasa.dp.ua, ORCID ID: 0000-0003-0790-6473

<sup>2</sup>Кафедра материаловедения и обработки материалов, Государственное высшее учебное заведение «Приднепровская государственная академия строительства и архитектуры», ул. Чернышевского, 24-а, 49600, Днепро, Украина, тел. +38 (0562) 47-39-56, e-mail: volchuky@gmail.com, ORCID ID: 0000-0001-7199-192X

<sup>3</sup>Кафедра материаловедения и обработки материалов, Государственное высшее учебное заведение «Приднепровская государственная академия строительства и архитектуры», ул. Чернышевского, 24-а, 49600, Днепро, Украина, тел. +38 (0562) 47-39-56, e-mail: mom@mail.pgasa.dp.ua, ORCID ID: 0000-0002-3213-4893

**Аннотация. Постановка проблемы.** Для идентификации сложных систем используются модели различного типа в зависимости от поставленных целей. Сложность выбора моделей обусловлена сложностью поведения рассматриваемых систем в различные моменты времени, в течение которого могут кардинально изменяться их основные свойства. **Основная часть.** На примере воздушной карусели Э. Лоренца показано применение фрактального моделирования для описания поведения численно неприводимых систем. Приведен алгоритм определения области самоподобия для исследуемого объекта, что, по мнению авторов, позволяет снизить вероятность нарушения штатного режима его работы. **Выводы.** Рассмотрены возможности применения фрактальных моделей для идентификации сложных систем.

**Ключевые слова:** математическая модель; сложная система; карусель Лоренца; фрактал; область самоподобия; атомный реактор

### ШЛЯХИ ІДЕНТИФІКАЦІЇ СКЛАДНИХ СИСТЕМ

БОЛЬШАКОВ В. І.<sup>1</sup>, *д-р техн. наук, проф.*,

ВОЛЧУК В. М.<sup>2</sup>, *д-р техн. наук, доц.*,

ДУБРОВ Ю. І.<sup>3</sup>, *д-р техн. наук, проф.*

<sup>1</sup>Кафедра матеріалознавства та обробки матеріалів, Державний вищий навчальний заклад «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури», вул. Чернишевського, 24-а, 49600, Дніпро, Україна, тел. +38 (0562) 47-39-56, e-mail: bolshakov@mail.pgasa.dp.ua, ORCID ID: 0000-0003-0790-6473

<sup>2</sup>Кафедра матеріалознавства та обробки матеріалів, Державний вищий навчальний заклад «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури», вул. Чернишевського, 24-а, 49600, Дніпро, Україна, тел. +38 (0562) 47-39-56, e-mail: volchuky@gmail.com, ORCID ID: 0000-0001-7199-192X

<sup>3</sup>Кафедра матеріалознавства та обробки матеріалів, Державний вищий навчальний заклад «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури», вул. Чернишевського, 24-а, 49600, Дніпро, Україна, тел. +38 (0562) 47-39-56, e-mail: mom@mail.pgasa.dp.ua, ORCID ID: 0000-0002-3213-4893

**Анотація. Постановка проблеми.** Для ідентифікації складних систем використовуються моделі різного типу залежно від поставлених цілей. Складність вибору моделей зумовлена складністю поведінки розглянутих систем у різні моменти часу, протягом якого можуть кардинально змінюватися їх основні властивості. **Основна частина.** На прикладі повітряної каруселі Е. Лоренца показано застосування фрактального моделювання для опису поведінки чисельно незвідних систем. Наведено алгоритм визначення області самоподібності для досліджуваного об'єкта, що, на думку авторів, дозволяє знизити ймовірність порушення штатного режиму його роботи. **Висновки.** Розглянуто можливості застосування фрактальних моделей для ідентифікації складних систем.

**Ключові слова:** математична модель; складна система; карусель Лоренца; фрактал; область самоподібності; атомний реактор

### WAYS OF IDENTIFICATION OF COMPLEX SYSTEMS

BOL'SHAKOV V. I.<sup>1</sup>, *Dr. Sc. (Tech.), Prof.*,

VOLCHUK V. N.<sup>2</sup>, *Dr. Sc. (Tech.), As. Prof.*,

DUBROV Yu. I.<sup>3</sup>, *Dr. Sc. (Tech.), Prof.*

<sup>1</sup>Department of Materials Science, State Higher Education Establishment «Pridneprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture», 24-a, Chernishevskogo str., Dnipro, 49600, Ukraine, tel. +38 (0562) 47-39-56, e-mail: bolshakov@mail.pgasa.dp.ua, ORCID ID: 0000-0003-0790-6473

<sup>2</sup>Department of Materials Science, State Higher Education Establishment «Pridneprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture», 24-a, Chernishevskogo str., Dnipro, 49600, Ukraine, tel. +38 (0562) 47-39-56, e-mail: volchuky@gmail.com, ORCID ID: 0000-0001-7199-192X

<sup>3</sup>Department of Materials Science, State Higher Education Establishment «Pridneprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture», 24-a, Chernishevskogo str., Dnipro, 49600, Ukraine, tel. +38 (0562) 47-39-56, e-mail: mom@mail.pgasa.dp.ua, ORCID ID: 0000-0002-3213-4893

**Abstract. Introduction.** To identify complex systems, models of different types are used depending on the goals set. The complexity of the choice of models is due to the complexity of the behavior of the systems under consideration at various times during which the basic properties of the systems can drastically change. **Main part.** The example of the airborne carousel E. Lorenz shows the use of fractal modelling to describe the behavior of numerically irreducible systems. It is presented an algorithm for determining the area of self-similarity of the object under consideration. According to the authors, the algorithm allows ones to reduce the probability of the object malfunctioning. **Conclusions.** It is considered a possibility of applying the fractal models for identification of complex systems.

**Keywords:** *mathematical model; complex system; Lorentz carrousel; fractal; self-similarity area; nuclear reactor*

**Введение.** На сегодняшний день сложно представить идентификацию объектов различной сложности без применения методов математического моделирования. Среди всех видов математических моделей сложных систем<sup>1</sup> особое место занимает модель, согласно применению которой необходимо производить обоснование её принадлежности к фрактальному типу [1-5]. При этом следует обратить особое внимание на то, что у отдельных объектов идентификации в некоторые моменты времени наблюдаются ситуации, при которых отдельные их составляющие (например, определяющий параметр), внезапно изменяют знак своего действия на противоположный.

Как это было ранее показано (см., например [6]), подобное явление продиктовано глобальной неустойчивостью объекта идентификации.

**Основная часть.** О глобальной неустойчивости, которая приводит к вычислительно неприводимым задачам идентификации некоторых, казалось бы, детерминированных объектов [7], стали говорить после открытия Э. Лоренцем так называемой «атмосферной карусели», которая, например, приводит к непрогнозируемости погоды [6]. Э. Лоренц

математически описал изменение атмосферы, на которую действуют два фактора: нагревание воздуха от земли и охлаждение его в её верхних слоях. В результате нагревания воздух расширяется и поднимается вверх, вытесняя холодный воздух, который опускается. Образуется своеобразная «карусель».

Сделав несколько оборотов в одном направлении, в какой-то момент времени эта карусель начнет вращаться в другом направлении, затем снова его сменит и т. д.

Природа этого явления достаточно проста. При больших перепадах температур скорость движения воздушной массы будет большой и она не успеет охладиться в верхней части, чтобы опуститься, и начнет «всплывать», что затормозит вращение этой «карусели». В результате вращение начинается в другом направлении и т. д.<sup>2</sup>

Если фиксировать моменты времени, в которых происходит смена направления вращения этой «карусели», будем получать случайную последовательность чисел. Многим технологиям присущ эффект карусели Лоренца.

*В этой связи исследования карусели Э. Лоренца как объекта идентификации приведены с целью демонстрации возможности применения фрактального*

<sup>1</sup>Сложной системой будем называть систему с относительно большим числом переменных, часть из которых изменяется непредсказуемым образом.

<sup>2</sup>Предполагается, что возникновение торнадо, смерчей и подобных явлений подчиняется аналогичным закономерностям.

*формализма для идентификации объектов и систем с частичным индетерминизмом.*

Составляющими определяющего параметра могут быть выбраны скорость воздушной массы и ее температура, после чего область самоподобия определится как постоянство отношения этих составляющих.

С учётом непредсказуемости момента изменения направления вращения карусели Э. Лоренца данный объект идентификации является вычислительно неприводимым [7].

В настоящей работе показано, как применение фрактального формализма к формированию математической модели этого объекта идентификации частично устраняет неопределённость, возникающую в результате неполноты формальной аксиоматики [7].

С целью частичного устранения неполноты формальной аксиоматики С. Бир рекомендовал использовать принцип «внешнего дополнения» [8], основанный на применении для формулирования утверждений языка высокого уровня, который не должен формулироваться в терминах языка, до этого применяемого. Вновь выбранные решения, выраженные языком более высокого уровня, призваны устранять недостатки первоначально используемого языка. Применение вновь избранного языка выступает в качестве практического метода, направленного на частичное устранение сложности, которая является следствием, вытекающим из теоремы Гёделя о неполноте [9; 10]. Следует ожидать, что новый язык также не сможет привести неразрешимое утверждение к точному определению. Для этого понадобится применение языка еще более высокого уровня и т. д.

С. Бир рекомендовал, чтобы выйти за рамки первоначально выбранного языка, но в то же время не оторваться от реальной ситуации, следует привязаться к такому свойству системы, которое неразрывно связано с ее действительным существованием. *В рамках фрактального формализма для формирования модели со сходным свойством считаем необходимым, устанавливать области самоподобия*

*определяющего параметра, а для доказательства верности утверждения «момент изменения направления вращения карусели Э. Лоренца прогнозируемый» применить принцип внешнего дополнения С. Бира.*

Для этого самоподобие области определяющего параметра будем описывать языком более высокого уровня, чем язык, применявшийся до этого, – языком фрактального формализма. Покажем, как применение этого языка способствует определению момента изменения направления вращения карусели Э. Лоренца. Для этого принимаем, что границы ОС карусели Э. Лоренца с допустимой погрешностью определяются постоянством отношений:

$$K = \frac{T_1 / v_1}{T_2 / v_2} \approx const,$$

где  $T_1$  и  $T_2$  – температуры воздушной массы в двух исследуемых областях;  $v_1$  и  $v_2$  – скорости воздушной массы в этих областях. Область  $v_1$  – область, в которой скорость воздушной массы определяется на минимальном расстоянии от поверхности земли (область минимального значения определяющего параметра); область  $v_2$  – это область, в которой скорость воздушной массы определяется на заданном расстоянии от поверхности земли (область максимального значения определяющего параметра).

Изменение направления вращения воздушной массы на противоположное происходит не мгновенно, а по мере приближения определяющего параметра к одной из границ области самоподобия, с изменением знака вращения. Время, идущее на изменение знака вращения, – время запаздывания, которое может изменяться в широком диапазоне от 0 до  $\infty$ .

Из вышеизложенного следует, что карусель Э. Лоренца может описываться фрактальной моделью, где размерность этой модели  $D$  пропорциональна значению коэффициента самоподобия:

$$D \sim K.$$

Как отмечалось ранее, относительно значительному числу технологий, при определённых условиях их функционирования, присущ эффект, порождаемый так называемой каруселью Э. Лоренца.

В этой связи для подобных технологий способ определения области самоподобия, приведенный выше, может служить аналогом индикатора, который постоянно регистрирует приближение определяющего параметра к одной из границ ОС, тем самым сигнализируя о вероятности возникновения нештатной ситуации.

Одной из таких технологий, на наш взгляд, является технология работы реактора на Чернобыльской атомной электростанции, известной в связи с аварией, произошедшей 26 апреля 1986 года.

Как показал опыт эксплуатации АЭС, первопричиной катастроф, происшедших на этих станциях, в большей части являлись нарушения, связанные с несвоевременной подачей управляющего сигнала на изменение количества подаваемого хладагента [11].

При своевременной подаче сигнала об увеличении вероятности возникновения нештатной ситуации, изменив подачу хладагента, ее можно было бы избежать. Для этого необходимо было бы на входе хладагента в рубашку атомного реактора, не нарушая установленной там защиты, определять одну из границ области самоподобия хладагента, установив в ней

соответствующий датчик, другую границу этой области самоподобия определить на выходе хладагента из рубашки реактора. Если, по мере приближения определяющего параметра, к одной из границ области самоподобия будет фиксироваться вероятность возникновения нештатной ситуации, то, по нашему мнению, аварии можно было избежать.

Процесс *охлаждения* в случае классических вентиляторных градирен происходит за счёт испарения части воды при стекании её тонкой плёнкой или каплями по специальному оросителю, вдоль которого в противоположном движению воды направлении подаётся поток воздуха (грубая модель карусели Э. Лоренца). В инновационных эжекционных градирнях *охлаждение* происходит за счёт создаваемой среды, приближаемой к условиям вакуума, специальными форсунками, и осуществляет принцип двойного действия, *охлаждая* распыляемую жидкость не только снаружи, но и внутри.

Существующая в настоящее время точность и надёжность измерительной аппаратуры позволяет производить своевременное определение нештатной ситуации по приведенной схеме.

**Выводы.** Предложены пути идентификации сложных систем с применением фрактального формализма, которые базируются на определении области самоподобия определяющего параметра.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Mandelbrot B. B. The Fractal Geometry of Nature : monograph / B. B. Mandelbrot. – New York, San Francisco : W. H. Freeman and Company. – 1982. – 480 p. – Режим доступа: <http://www.amazon.com/Fractal-Geometry-Nature-Benoit-Mandelbrot/dp/0716711869>.
2. Bol'shakov V. Fractals and properties of materials : monograph / V. Bol'shakov, V. Volchuk, Yu. Dubrov. – Saarbrücken : Lambert Academic Publishing, 2016. – 140 p. – Режим доступа: <https://www.lap-publishing.com/catalog/details/store/tr/book/978-3-330-01812-9/fractals-and-properties-of-materials?search=Fractals>.
3. Method of material quality estimation with usage of multifractal formalism / V. Volchuk, I. Klymenko, S. Kroviakov, M. Orešković // Tehnički glasnik = Technical Journal. – 2018. – Vol. 12, no. 2. – P. 93–97. – Режим доступа: <https://hrcak.srce.hr/202359>.
4. Большаков В. И. Основы организации фрактального моделирования : монография / В. И. Большаков, В. Н. Волчук, Ю. И. Дубров. – Киев : Академперіодика, 2017. – 170 с.
5. Волчук В. Н. К применению фрактального формализма при ранжировании критериев качества многопараметрических технологий / В. Н. Волчук // Металлофизика и новейшие технологии. – 2017. – Т. 39, вып. 7. – С. 949–957. – Режим доступа: <http://mfint.imp.kiev.ua/ru/abstract/v39/i07/0949.html>.

6. Журавель І. М. Вибір налаштувань під час обчислення поля фрактальних розмірностей зображення / І. М. Журавель // Науковий вісник НЛТУ України : зб. наук. пр. / Нац. лісотехн. ун-т України. – 2018. – Т. 28, № 2. – С. 159–163. – Режим доступу: <https://doi.org/10.15421/40280230>.
7. Lorenz E. N. Deterministic nonperiodic flow / E. N. Lorenz // Journal of the Atmospheric Sciences. – 1963. – Vol. 20, iss. 20. – Pp. 130–148.
8. Дубров Ю. Вычислительно неприводимые системы и пути их идентификации : монография / Ю. Дубров. – Saarbrücken : Palmarium Academic Publishing, 2016. – 188 с.
9. Бир Ст. Кибернетика и управление производством : монография / Ст. Бир ; пер. с англ. В. Я. Алтаева. – Москва : Физматгиз, 1963. – 276 с.
10. Gödel K. Über formal unentscheidbare Sätze der Principia Mathematica und verwandter Systeme, I. / K. Gödel // Monatshefte für Mathematik und Physik. – 1931. – Vol. 38. – P. 173–198.
11. Часткова компенсація неповноти формальної аксіоматики при ідентифікації структури металу / Вад. І. Большаков, В. І. Большаков, В. М. Волчук, Ю. І. Дубров // Вісник Національної Академії наук України. – 2014. – № 12. – С. 45–48. – Режим доступу: <http://dspace.nbuv.gov.ua/handle/123456789/73434>.
12. Чернобыльская авария: дополнение к INSAG-1: INSAG-7 : докл. Междунар. консультатив. группы по ядер. безопасности / Междунар. агентство по атом. энергии. – Вена : МАГАТЭ, 1993. – (Серия изданий по безопасности No. 75-INSAG-7). – Режим доступу: [https://www-pub.iaea.org/mtcd/publications/pdf/pub913r\\_web.pdf](https://www-pub.iaea.org/mtcd/publications/pdf/pub913r_web.pdf).

## REFERENCES

1. Mandelbrot B.B. *The Fractal Geometry of Nature*. New York, San Francisco: W. H. Freeman and Company. 1982, 480 p. Available at: <http://www.amazon.com/Fractal-Geometry-Nature-Benoit-Mandelbrot/dp/0716711869>
2. Bolshakov V., Volchuk V. and Dubrov Yu. *Fractals and properties of materials*. Saarbrücken: Lambert Academic Publishing, 2016, 140 p.
3. Volchuk V., Klymenko I., Kroviakov S., Orešković M. *Method of material quality estimation with usage of multifractal formalism*. Tehnički glasnik. Technical Journal. 2018, vol. 12, no. 2, pp. 93–97.
4. Bolshakov V.I., Volchuk V.N. and Dubrov Yu.I. *Osnovy organizatsii fraktal'nogo modelirovaniya* [Fundamentals of fractal modeling]. Kiev: Akadempriodika, 2017, 170 p. (in Russian).
5. Volchuk V.M. *K primeneniyu fraktal'nogo formalizma pri ranzhirovanii kriteriev kachestva mnogoparametricheskikh tekhnologiy* [On the application of fractal formalism for ranging criteria of quality of multiparametric technologies]. *Metallofizika i noveyshiye tekhnologii* [Metal physics and advanced technologies]. 2017, vol. 39, no 3, pp. 949–957. Available at: <http://mfint.imp.kiev.ua/ru/abstract/v39/i07/0949.html> (in Russian).
6. Zhuravel I.M. *Vybir nalashuvan pid chas obchyslennia polia fraktalnykh rozmirnostey zobrazhennia* [Choice of settings while calculating the field of fractal dimension of image]. *Naukovyi visnyk NLTU Ukrainy* [Scientific Bulletin of UNFU]. 2018, vol. 28, no 2, pp. 159–163. Available at: <http://mfint.imp.kiev.ua/ru/abstract/v39/i07/0949.html> (in Ukrainian).
7. Lorenz E.N. *Deterministic nonperiodic flow*. Journal of the Atmospheric Sciences. 1963, vol. 20, pp. 130–141.
8. Dubrov Yu. *Vychislitel'no neprivodimye sistemy i puti ikh identifikatsii* [Computationally irreducible systems and the ways to identify them]. Saarbrücken: Palmarium Academic Publishing, 2016, 190 p. (in Russian).
9. Bir St. *Kibernetika I upravlenie proizvodstvom* [Cybernetics and Management]. Moscow: Fizmatgiz, 1963, 276 p. (in Russian).
10. Gödel K. *Über formal unentscheidbare Sätze der Principia Mathematica und verwandter Systeme*. Monatshefte für Mathematik und Physik. 1931, vol. 38, pp. 173–198. (in German).
11. Bolshakov Vad.I., Bolshakov V.I., Volchuk V.M. and Dubrov Yu.I. *Chastkova kompensatsiia nepovnoty formalnoi aksiomatyky pry identyfikatsii struktury metalu* [The partial compensation of incompleteness of formal axiomatics in the identification of the metal structure]. *Visnyk Natsionalnoi Akademii nauk Ukraini* [Bulletin of the National Academy of Sciences of Ukraine]. 2014, no. 12, pp. 45–48. (in Ukrainian).
12. *Chernobul'skaya aviariya: dopolnenie k INSAG-1: INSAG-7* [The Chernobyl accident: updating of INSAG-1: INSAG-7]. *Doklad Megdunarodnoy konsultativnoy grupy po yadernoy bezopasnosti* [Report of international consulting group of nuclear safety]. *Megdunarodnoe agentstvo po atomnoy energii* [International atomic energy agency]. Vienna, 1992. Available at: [https://www-pub.iaea.org/mtcd/publications/pdf/pub913r\\_web.pdf](https://www-pub.iaea.org/mtcd/publications/pdf/pub913r_web.pdf).

Рецензент: Башев В. Ф., д-р техн. наук, проф.

Надійшла до редколегії: 12.02.2018 р.