

УДК 53.083.92-53.088.23

Ю. С. КУРСКОЙ, кандидат технических наук, доцент
Украинская инженерно-педагогическая академия, г. Харьков

ФРАКТАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ

В статье рассмотрены вопросы измерений в нелинейных динамических системах (НДС). Предложены подходы, модели измерения и анализа результатов измерения динамических переменных (ДП) НДС. Показано, что к таким системам можно отнести электрические сети общего назначения. Проведены измерения напряжения в электрической сети. Исследована динамика поведения напряжения методом фрактального анализа результатов измерения. Анализ показал, что в течение времени наблюдения напряжение меняло характер своей динамики от случайного до персистентного и регулярного.

У статті розглянуті питання вимірювань у нелінійних динамічних системах. Запропоновано підходи, моделі вимірювання та аналізу результатів вимірювання динамічних змінних нелінійних динамічних систем. Показано, що до таких систем можна віднести електричні мережі загального призначення. Проведено вимірювання напруги в електричній мережі. Досліджено динаміку поведінки напруги методом фрактального аналізу результатів вимірювання. Аналіз показав, що протягом часу спостереження напруга змінювала характер своєї динаміки від випадкового до персистентного і регулярного.

Введение

Измерения в НДС. Одной из основных задач государственной метрологической системы является обеспечение качества изготавливаемой продукции и оказываемых услуг. Ключевым инструментом ее реализации является процесс измерения физических величин, характеризующих объект или процесс. При этом успешность измерения зависит от совершенства средств измерения и методов его исполнения.

В основе метрологических методов лежат физические представления и математические описания объекта измерения – физические и математические модели. Степень соответствия моделей реальному процессу определяет качество измерительного эксперимента.

Современная метрологическая наука имеет в своем распоряжении инструменты, способные решить многие традиционные задачи технических измерений. Однако сегодня перед метрологией возникают новые, нетрадиционные задачи, решить которые в рамках имеющихся подходов затруднительно или невозможно вовсе. К таким задачам относятся: измерение параметров биологических, экологических и социальных систем; измерение людских и природных ресурсов; измерение показателей экономики; измерение характеристик живого организма и другие. Именно эти направления становятся приоритетными для современной метрологической науки [1].

Все перечисленные задачи имеют общие черты: объекты измерения находятся во внешней среде и подвержены ее воздействию, а их параметры меняются во времени по нелинейным законам – являются динамическими переменными. С метрологической точки зрения, это задачи по измерению ДП открытых, диссипативных НДС со сложным характером поведения. Их решение требует создания принципиально новых метрологических подходов и инструментов.

НДС несколько десятилетий находятся в центре изучения специалистов различных областей науки. Исследования показали, что к такого рода системам можно отнести большинство из систем окружающего мира. Поведение ДП таких систем сложно, может носить регулярный, случайный или хаотичный характер. При этом, в силу внутренних процессов или внешнего влияния режимы поведения могут чередоваться и протекать различное время [2].

Взгляд на окружающий мир как на совокупность НДС привел к необходимости ответить не вопрос о соответствии традиционных метрологических подходов и методов задачам измерения в НДС. Исследования показали, что традиционные метрологические подходы и модели созданы, главным образом, для ситуаций, когда измеряемая величина или неизменна во времени, либо закон ее изменения известен, а разброс результатов измерения носит случайный характер [3]. В случае реальных НДС говорить о неизменных значениях ее характеристик не приходится, а примеры удачного составления уравнений сложного поведения ДП НДС единичны.

В этой связи возникла необходимость выработки новых подходов и моделей для измерений в НДС. В этом направлении проведены исследования, которые позволили получить такие результаты: изучены особенности влияния хаотического поведения динамических систем на неопределенность измерения [4]; предложена фрактальная шкала для анализа временных рядов результатов измерений [5]; создана модель измерения параметров НДС [6]; предложены подходы и модель анализа результатов измерений в НДС [7]; процесс измерения ДП НДС рассмотрен с позиций информационной теории и предложен энтропийный анализ результатов измерений [8].

Применение метрологических подходов и моделей, изложенных в [4–8] способно повысить качество измерений в реальных системах, к которым можно отнести электрические сети. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения регламентируются межгосударственным стандартом ГОСТ 13109-97 [9]. Качество представляет собой интегральную характеристику, отображающую соответствие основных характеристик продукции ожиданиям потребителя и требованиям нормативных документов. Одной из характеристик качества электрического тока в сети является его напряжение.

С позиций теории систем электрическую сеть можно рассматривать как открытую НДС с функцией самоорганизации, а напряжение в сети как одну из ее ДП. Такая НДС подвержена внешним воздействиям — увеличению или уменьшению нагрузки. Внешние воздействия приводят к изменению значения ДП по неизвестному закону. При уменьшении внешнего воздействия ДП стремится вернуться к своему равновесному состоянию. К измерению параметров электрической сети могут быть применены подходы и модели измерения ДП НДС [4–8].

Целью работы является исследование динамики поведения напряжения электрической сети общего назначения методом фрактального анализа результатов измерения.

Фрактальный анализ результатов измерения

Действенным методом оценки динамики процесса по результатам измерения является фрактальный анализ временного ряда результатов измерения:

$$x(t_1), x(t_2), \dots, x(t_n) \quad (1)$$

В основе метода лежат понятия «фрактал» и «фрактальная размерность» D [10]. Фрактальная размерность D характеризует сложность фазового портрета процесса или системы, принимает как целые, так и дробные значения. Расчет фрактальной размерности D временного ряда (1) позволяет сделать вывод о случайности, регулярности или хаотичности процессов [11]. Для простых множеств фрактальная размерность совпадает с топологической размерностью: в случае детерминированной кривой $D = 1$, в случае гладкой поверхности $D = 2$ [10]. Все остальные, дробные значения фрактальной размерности находятся внутри интервала $1 < D < 2$ и характеризуют случайный, хаотический характер исследуемого множества (1).

Исходя из этого в [5] предложена фрактальная шкала оценки результатов измерения (1). Шкала была успешно применена для оценки динамики поведения параметров лазера.

Фрактальная шкала имеет три характерные точки $D = 1$, $D = 1,5$, $D = 2$:

- при $D=1$ результат измерения трактуется как строго детерминированное поведение системы, возможно составление уравнения поведения ДП;
- при $D=2$ система ведет себя регулярным образом, но разброс измеряемых значений очень велик, что не позволяет использовать методы обработки результатов измерений;
- при $D=1,5$ процесс является случайным, для анализа значений характеристик таких систем применяются статистические методы;
- при $1 < D < 1,5$ рассматриваемый процесс представляется как персистентный (измеряемая величина сохраняет тенденцию увеличения или уменьшения своего значения) и приближается к детерминированному закону;
- при $1,5 < D < 2$, процесс представляется антиперсистентным (измеряемая величина меняет на противоположную тенденцию увеличения или уменьшения своего значения) и имеет случайный (шумовой) разброс, превышающий величину медленных изменений.

Для определения фрактальной размерности временного ряда (1) используется статистический метод нормированного размаха (R/S -анализ), выведенный эмпирическим путем П. Херстом [12]. Анализ временного ряда наблюдений методом Херста позволяет получить одноименный показатель H , который связан с фрактальной размерностью D временного ряда выражением:

$$D = 2 - H \quad (2)$$

Показатель Херста H рассчитывают методом постепенно увеличивающегося интервала наблюдений (1) и определяется через величину R/S , где R – размах между максимальным и минимальным, значениями функции приращения $x(i, n)$, а величина S – среднее квадратичное отклонение [12]:

$$\left. \begin{aligned} R(i) &= \max_{1 \leq i \leq n} x(i, n) - \min_{1 \leq i \leq n} x(i, n), \\ x(i, n) &= \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x}_i), \\ S &= \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{n=1}^N (x_n - \bar{x}_i)^2}, \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

где \bar{x}_i – среднее арифметическое значений (1)

Соотношение R/S связано с параметром Херста H выражением:

$$\frac{R}{S} = \left(\frac{n}{2}\right)^H \quad (4)$$

Из выражений (2) и (4) можно получить значение фрактальной размерности как всего интервала наблюдения (1), так и его отдельных интервалов, определить характер динамики измеряемой ДП на отдельных временных интервалах, так и в период наблюдения в целом.

Измерение напряжения в сети

В качестве объекта исследования была выбрана электрическая сеть общего назначения дачного поселка. Сеть характеризуется нестабильными значениями напряжения электрического тока в вечерние часы и выходные дни, в период максимальной нагрузки. После истечения времени максимальной нагрузки значение напряжения стабилизируется. Такую сеть можно считать открытой НДС с функцией самовосстановления, параметры которых подвержены внешним воздействиям. В качестве ДП НДС выбрано напряжение U .

При проведении исследования проводились измерения напряжения U в интервал времени с 17:15 до 24:00, формировался временной ряд результатов измерения $U(t)$ (1). Измерения проводились по следующей схеме. Каждые пятнадцать минут с интервалом в

пять секунд выполнялся ряд измерений ДП. Такая схема измерительного эксперимента вызвана необходимостью оценить динамику поведения НДС на всем интервале наблюдения и в отдельные промежутки времени. Результаты измерения представлены на рисунке.

Согласно рисунку в наблюдаемый период напряжение проявляло ярко выраженную динамику. Имели место непродолжительные интервалы стабильности и значительных спадов значений ДП. Измерения показали, что минимальное значение $U_{\min} = 159$ В наблюдалось в 21:15. Максимальное значение $U_{\max} = 206$ В наблюдалось в момент времени 24:00. Эти значения можно соотнести с максимальным и минимальным уровням энергопотребления в сети. Среднее арифметическое значение напряжения составило $\bar{U} = 187$ В. Значения $U = 220$ В за период наблюдения зафиксировано не было (рисунок). Согласно основным положениям модели измерения ДП НДС [6] полученные значения U_{\min} и U_{\max} являются границами аттрактора, содержащие все значения ДП за период наблюдения: $U_{\min} \leq U(t) \leq U_{\max}$.

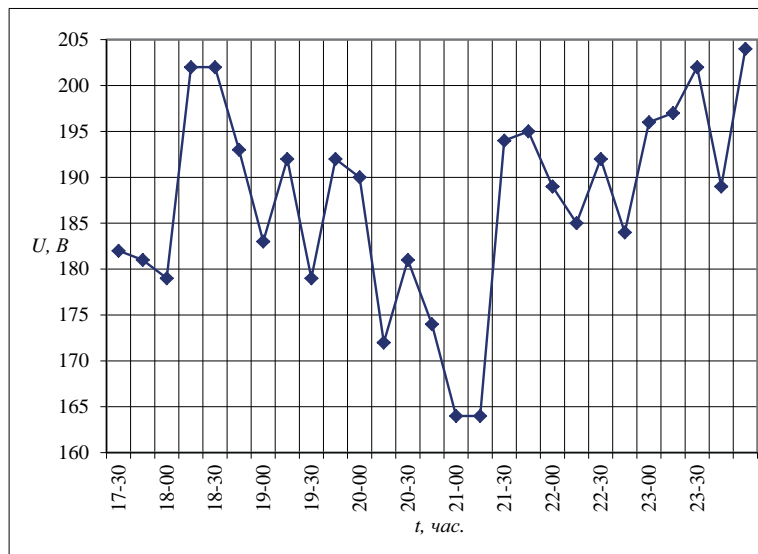


Рисунок. Результаты измерения напряжения в сети

Для анализа результатов измерения был исследован временной ряд $U(t)$. Рассчитаны значения показателя Херста H (3), (4) и фрактальной размерности D (2) для всего интервала наблюдений и для некоторых, характерных интервалов времени, когда ДП $U(t)$ или сохраняла свою динамику поведения, или меняла на противоположную (таблица).

Фрактальный анализ показал, что на всем интервале наблюдения динамика поведения ДП $U(t)$ близка к случайному поведению $D=1,47$. Тем не менее, белый шум наблюдается при $D=1,5$. И такие значения фрактальной размерности были свойственны некоторым интервалам временного ряда, например интервалу наблюдений, начатых в 23:30. В остальных случаях фрактальная размерность принимала значения на интервале $1 \leq D < 1,5$. Это означает, что рассматриваемый процесс является персистентным. При этом ДП $U(t)$ сохраняет тенденцию увеличения или уменьшения своего значения и приближается к детерминированному закону. Отдельные интервалы характеризуются различной степенью персистентности. Так, для интервала наблюдения, начатого в 22:00 $D=1,04$ и процесс становится практически детерминированным, а для интервала наблюдения, начатого в 19:30 $D=1,46$ и процесс становится практически случайным. На отдельных интервалах времени, в 23:00, 23:15 ДП ведет себя детерминированным образом $D=1$. Полученные результаты исследования согласуются с работами Херста, в которых он показал, что для многих естественных процессов $H > 0,5$ [12].

Результаты расчета параметра Херста и фрактальной размерности временного ряда результатов измерения напряжения

t	17:30	19:15	19:30	19:45	21:00	21:15	21:30	21:45	22:00	22:45	23:00	23:15	23:30	23:45	24:00
H	0,7	0,92	0,54	0,7	0,6	0,73	0,95	0,85	0,96	0,83	1	1	0,51	0,7	0,8
D	1,3	1,08	1,46	1,3	1,4	1,27	1,05	1,15	1,04	1,17	1	1	1,49	1,3	1,2

Таким образом, результаты фрактального анализа временного ряда результатов измерения показали, что на коротких интервалах наблюдения ДП $U(t)$ вела себя персистентным образом, сохраняя динамику поведения. Согласно основным положениям теории открытых НДС система способна сохранить динамику своего поведения на интервале времени равном времени горизонта прогноза. После прохождения этого времени НДС меняет характер своего поведения, что видно из результатов исследования. Именно переменной характера поведения объясняется тот факт, что на длинном интервале наблюдения поведение наблюдаемой НДС близко к случайному $D = 1,47$.

Применение фрактального анализа позволяет оценить динамику поведения НДС на всем интервале наблюдения и в отдельные интервалы, что позволяет определить интервалы случайного, персистентного или регулярного поведения ДП.

Выводы

В статье рассмотрены новые задачи современной метрологической науки.

Рассмотрены новые подходы, модели измерений и анализа результатов измерения динамических переменных нелинейных динамических систем.

Показано, что к нелинейным динамическим системам можно отнести электрические сети общего назначения.

Проведены измерения напряжения в электрической сети. Исследована динамика поведения напряжения методом фрактального анализа результатов измерения.

Анализ показал, что в течение времени наблюдения напряжение меняет характер своего поведения от случайного до персистентного и регулярного.

Список литературы

1. Fisher W. P. New metrological horizons: invariant reference standards for instruments measuring human, social, and natural capital [Text] / W. P. Fisher // 12th IMEKO TC1 & TC7 Joint Symposium on Man Science & Measurement September, 3 – 5, 2008, Annecy, France. – 2008. – P. 51–58.
2. Лоскутов А. Ю. Очарование хаоса [Текст] / А. Ю. Лоскутов // Успехи физических наук. – 2010. – Том 180. – № 12. – С. 1304–1329.
3. Мачехин Ю. Особенности влияния хаотического поведения динамических систем на неопределенность измерения [Текст] / Ю. Мачехин // Измерительная техника. – 2008. – Вып. 01. – С. 38–45.
4. Machekhin Yu. Measurement science foundations [Текст] / Ю. Мачехин // Системы обработки информации. – 2011. – Вып. 06 (96). – С. 36–40.
5. Мачехин Ю. Фрактальная шкала для временных рядов результатов измерений [Текст] / Ю. Мачехин // Измерительная техника. – 2008. – Вып. 08. – С. 40–43.
6. Мачехин Ю. Модель измерения параметров нелинейных динамических систем [Текст] / Ю. Мачехин, Ю. Курской // Системы обработки информации. – 2012. — Вып. 01 (99). – С. 169–175.
7. Мачехин Ю. Анализ результатов измерений в нелинейных динамических системах [Текст] / Ю. Мачехин, Ю. Курской // Системы обработки информации. – 2012. – Вып. 07 (105). – С. 117–122.
8. Мачехин Ю. Энтропийный анализ динамических переменных [Текст] / Ю. Мачехин,

Ю. Курской // Системы обработки информации. — 2013. — Вып. 01 (106). — С. 117-122.

9. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения: ГОСТ 13109-97. [действующий от 1999-17-11]. — М.: МГС. 1997. — 33 с. (межгосударственный стандарт).

10. Mandelbrot B. V. The Fractal Geometry of Nature [Text] / San Francisco: Freeman, 1982. — 491 p.

11. Кроновер Р. М. Фракталы и хаос в динамических системах. Основы теории / пер. с английского [Текст] / М.: Постмаркер, 2000. — 352 с.

12. Федер Е. Фракталы [Текст] / М.: Мир, 1991. — 258 с.

FRACTAL ANALYSIS OF ELECTRICAL MEASUREMENTS RESULTS

YU. S. KURSKOY, Candidate of Engineering, Associate Professor
Ukrainian Engineering and Pedagogical Academy, Kharkov

It is observed the tasks of measurement in nonlinear dynamical systems. The new metrological approaches, measurement model and model for analysis of measurement results of dynamic variables of nonlinear dynamical systems are discussed. It is shown that electrical networks of general purpose can be researched as the nonlinear dynamical systems. The voltage of electrical network was measured. The dynamic of the voltage behavior was realized the way of fractal analysis of measurement results. The fractal analysis showed that during the observation voltage had changed the nature of its dynamic from random to regular and persistent.

1. Fisher W. P. New metrological horizons: invariant reference standards for instruments measuring human, social, and natural capital [Text] / W. P. Fisher // 12th IMEKO TC1 & TC7 Joint Symposium on Man Science & Measurement September, 3 – 5, 2008, Annecy, France. — 2008. — P. 51-58.

2. Loskutov A. Yu. Ocharovanie haosa [Text] / A. Yu. Loskutov // Uspehi Fisicheskikh nauk. — 2010. — Vol. 180. — № 12. — С. 1304–1329.

3. Machekhin Yu. Osobennosti vliyaniya haoticheskogo povedeniya dinamicheskikh sistem na neopredelennost ismereniy [Text] / Yu. Machekhin // Izmeritelnaya tehnika. — 2008. — № 01. — P. 38–45.

4. Machekhin Yu. Measurement science foundations [Text] / Yu. Machekhin // Sisremi obrabotki informacii. — 2011. — № 06 (96). — P. 36–40.

5. Machekhin Yu. Fractalnie shkali dlya vremennih ryadov rezultatov yzmereniya [Text] / Yu. Machekhin // Izmeritelnaya tehnika. — 2008. — № 08. — P. 40–43.

6. Machekhin Yu. Model izmereniya parametrov nelineynih dinamicheskikh sistem [Text] / Yu. Machekhin, Yu. Kurskoy // Sisremi obrabotki informacii. — 2012. — № 01 (99). — P. 169–175.

7. Machekhin Yu. Analiz rezultatov izmereniy v nelineynih dinamicheskikh sistemah [Text] / Yu. Machekhin, Yu. Kurskoy // Sisremi obrabotki informacii. — 2012. — № 07 (105). — P. 117–122.

8. Machekhin Yu. Entropiyuniy analiz dinamicheskikh peremennih [Text] / Yu. Machekhin, Yu. Kurskoy // Sisremi obrabotki informacii. — 2013. — № 01 (106). — P. 117–122.

9. Elektricheskaya energiya. Normi kachestva elektricheskoy energii v sistemah electrosnabgenita obshego naznacheniya: GOST 13109-97. [1999-17-11]. — М.: МГС. 1997. — 33 p. (mezhgosudarstvennyy standart).

10. Mandelbrot B. V. The Fractal Geometry of Nature [Text] / San Francisco: Freeman, 1982. — 491 p.

11. Kronover R. M, Fractali I haos v dinamicheskikh sistemah. Osnovi teorii [Text] / М.: Postmarker, 2000. — 352 p.

12. Feder E. Fractali [Text] / М.: Mir, 1991. — 258 p.

Поступила в редакцию 15. 12 2013 г.