

А.А. Яланский, д-р техн. наук (ИГТМ НАНУ)

Алекс. А. Яланский, канд. техн. наук,

Н.А. Иконникова, ассистент (НГУ)

В.В. Арестов, асп. (СБУ),

Т.И. Яровая, инженер (Днепрогипрошахт)

ХАОТИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ В ГОРНЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ, ОСОБЕННОСТИ МОДЕЛИРОВАНИЯ И КОНТРОЛЯ ИХ УСТОЙЧИВОСТИ НА ОСНОВЕ ГЕНЕРАТОРОВ ДИНАМИЧЕСКОГО ХАОСА

Проведені дослідження хаотичних процесів методами математичного моделювання, на основі яких створені нові методи та засоби натурного моделювання та контролю стійкості гірничих технічних систем, включаючи структурну та алгоритмічну організацію, інформаційні технології їх використання при проведенні досліджень.

CHAOTIC PROCESSES IN THE MINING TECHNICAL SYSTEMS. FEATURES OF MODELLING AND THE CONTROL OF THEIR STABILITY ON THE BASIS OF GENERATORS OF DYNAMIC CHAOS.

Researches of chaotic processes are executed by methods of mathematical modelling. New methods and ways of natural modelling and the control of stability of the mining technical systems are developed.

В горных технических системах, прежде всего, в силу специфики геологического строения породных массивов, высокой фрактальной размерности горных пород и полезных ископаемых, являющихся одновременно объектами, вмещающими шахты, рудники и подземные сооружения, и объектами добычи и переработки, возможно как самопроизвольное возникновение процессов самоорганизации, так и процессов динамического хаоса. Эти процессы могут быть доминирующими или частичными, а в зависимости от положения равновесия – устойчивыми или неустойчивыми, потеря устойчивости может быть мягкой или жесткой [1 – 7].

С целью изучения явления динамического хаоса в этих системах авторами в оболочке Mathcad апробированы генераторы хаоса, полученные на основе классических систем уравнений Лоренца (1) и Ресслера (2), отображений Хенона (3) и Икеды (4), функции Вейерштрасса – Мандельброта (5), уравнения Меки – Гласса (6), а также двухмерный (7) и трехмерный генераторы Ван дер Поля (8), генераторы на основе логистического отображения (9) и несимметричного TENT-отображения (10) [8 – 10].

Система уравнений Лоренца (Lorenz System):

$$\begin{cases} \frac{dx}{dt} = -\sigma(x - y), \\ \frac{dy}{dt} = x(r - z) - y, \\ \frac{dz}{dt} = xy - bz \end{cases}, \quad (1)$$

где динамика системы определяется управляющими параметрическими коэффициентами σ , r и b : $\sigma = 10$; $r = 28$; $b = 8/3$.

Система уравнений Ресслера (Rossler System):

$$\begin{cases} dx/dt = -y - z, \\ dy/dt = x + ay, \\ dz/dt = b + xz - cz \end{cases}, \quad (2)$$

где параметрические коэффициенты: $a = 0,2$; $b = 0,2$; $c = 5$.

Отображение Хенона (Henon Map):

$$\begin{cases} x_{i+1} = 1 - ax_i^2 = by_i, \\ y_{i+1} = x_i \end{cases}, \quad (3)$$

где параметрические коэффициенты: $a = 1,4$; $b = 0,3$.

Отображение Икеды (Ikeda Map):

$$\begin{cases} x_{i+1} = 1 + c(x_i \cos(\alpha_i) - y_i \sin(\alpha_i)), \\ y_{i+1} = c(x_i \sin(\alpha_i) + y_i \cos(\alpha_i)), \end{cases} \quad \text{где } \alpha_i = a - b/(1 + x_i + y_i), \quad (4)$$

где параметрические коэффициенты: $a = 0,4$; $b = 6$; $c = 0,9$.

Функция Вейерштрасса-Мандельброта (Weierstrass-Mandelbrot):

$$\begin{aligned} \operatorname{Re} W(t) &= \sum_{m=-\infty}^{\infty} \frac{1 - \cos b^m t}{b^{(2-D)m}}, \\ \operatorname{Im} W(t) &= - \sum_{m=-\infty}^{\infty} \frac{\sin b^m t}{b^{(2-D)m}} \end{aligned}, \quad (5)$$

где параметрические коэффициенты: $b = 1,5$; $D = 1,5$.

Уравнение Меки-Гласса (Makey-Glass):

$$x_{i+1} = x_i + \frac{bx_{i-\tau}}{1 + x_{i-\tau}^c} - ax_i, \quad (6)$$

где параметрические коэффициенты: $a = 0,1$; $b = 0,2$; $c = 10$; $\tau = 30$.

Двумерный генератор Ван дер Поля (Van der Pole 2D Generator):

$$\begin{cases} dx/dt = y, \\ dy/dt = a(1 - bx^2)y - x \end{cases}, \quad (7)$$

где параметрические коэффициенты: $a = 1$; $b = 0,3$.

Трехмерный генератор Ван дер Поля (Van der Pole 3D Generator):

$$\begin{cases} dx/dt = y, \\ dy/dt = a(1 - bx^2)y - x + z, \\ dz/dt = B \sin(pt) \end{cases} \quad (8)$$

где параметрические коэффициенты: $a = 1$; $b = 0,3$; $B = 1$; $p = 1, 5$.

Генератор на основе логистического отображения:

$$x_{i+1} = \lambda x_i (1 - x_i). \quad (9)$$

Генератор на основе несимметричного TENT-отображения:

$$x_{i+1} = \begin{cases} 1 - \beta x_i, & x_i \geq 0, \\ 1 - \alpha x_i, & x_i < 0 \end{cases}. \quad (10)$$

При этом проведены исследования по оценке роли управляющих параметров путем изменения их величины на работу апробированных генераторов хаоса и устойчивость систем, рис. 1. Следует обратить особое внимание, что все системы уравнений обладают нелинейностью. Исследования показали, что они работают при определенных параметрических коэффициентах, изменяя которые, можно усилить эффект хаотизации или же полностью избавиться от него.

О принципиальной эффективности исследований и их применимости для изучения работы технических систем (горных машин, электрогенераторов, электромоторов) и различных механизмов (турбин, насосов, двигателей) можно судить по рис. 2, на котором приведены результаты моделирования работы генератора хаоса на основе функции Вейерштрасса-Мандельброта (5). Даже из простого визуального анализа рисунка видно, что при определенных параметрических коэффициентах (близких к $b = 1,5$; $D = 1,5$) во вращающихся системах теоретически возможно возникновение динамического хаоса, который независимо от массы системы, положения оси системы и других конструктивных параметров приведет к неравномерному износу механизма, например подшипников.

Составлена авторская программа для автоматизированного определения клеточной фрактальной размерности по фактическому материалу, который предварительно сканируется в компьютер для обработки. Поскольку считается, что функция Вейерштрасса-Мандельброта (5) имеет размерность D , которая аналогична размерности самоподобных множеств и равна параметрическому коэффициенту D [10], то эти результаты использованы как тестовые для апробации программы и показали хорошую сходимость.

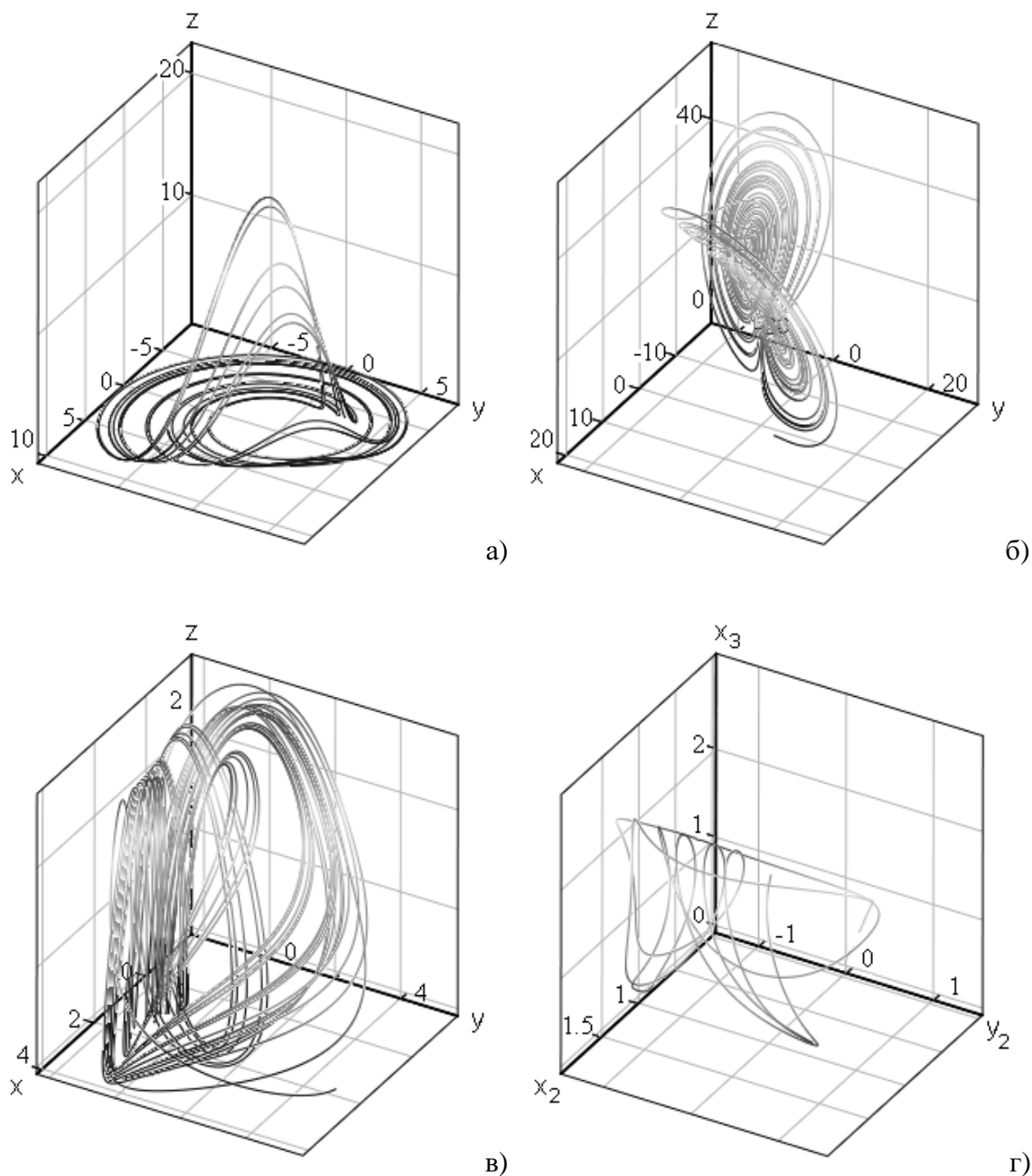


Рис. 1 – Траектории, описываемые классическими хаотическими системами в трехмерном фазовом пространстве: а) система Ресслера; б) система Лоренца; в) генератор Ван дер Поля; г) трехмассовая система маятников.

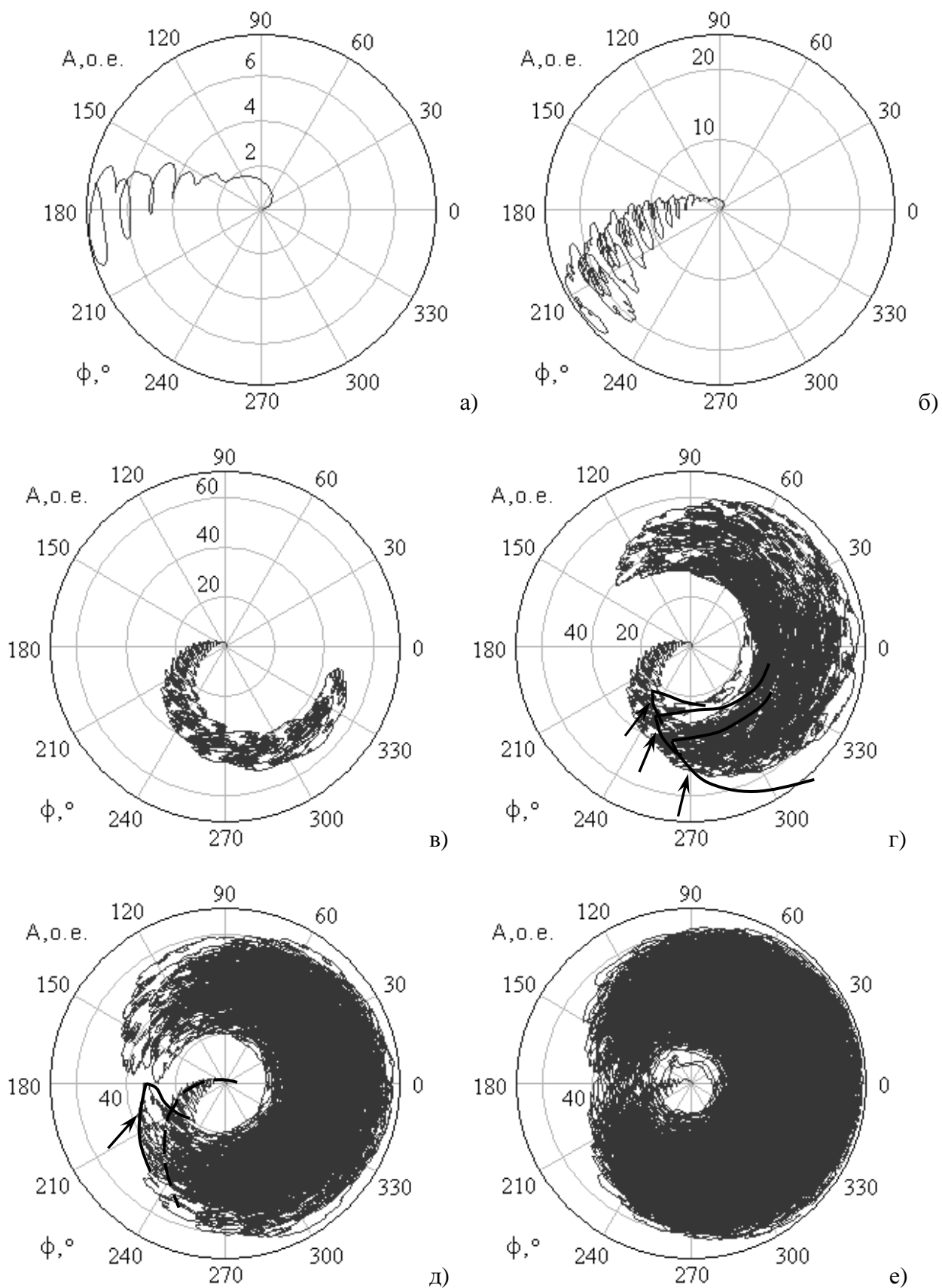


Рис. 2 – Фрактальный характер вихревого процесса, развивающегося в системе:
 а) $h = 0,01$, $n = 10^2$; б) $h = 0,01$, $n = 10^3$; в) $h = 0,01$, $n = 10^4$; г) $h = 0,01$,
 $n = 10^5$; д) $h = 0,05$, $n = 10^5$; е) $h = 0,1$, $n = 4 \cdot 10^5$.

Различают стохастические (случайные) и детерминированные (ограниченные, определенные) хаотические движения. Случайное движение – это движение, когда действующие на систему силы неизвестны, а известны только их статистические характеристики. Хаотическое детерминированное движение – это движение, в котором все же существует зависимость от начальных условий и фазовая траектория системы возвращается в ограниченную область пространства. Но при этом весьма малая неточность в начальном состоянии системы обуславливает большую разницу между параметрами системы в ее конечном состоянии. В этой связи, при хаотических колебаниях теряется информация о начальном состоянии и предвидеть изначально дальнейшее поведение системы становится невозможно. Для такого движения характерно наличие хаотического изменения периодов возвратов Пуанкаре, канторовоподобного рассеивания траекторий в сечениях Пуанкаре, непрерывного спектра частот, расположенного ниже частоты бифуркации [8, 10].

Наличие хаотической динамики тесно связано с неустойчивостью, которая присуща фазовым траекториям системы и создает возможность соединить казалось бы несоединимое – динамическую природу системы, то есть предсказуемость, и хаос, то есть непредсказуемость. Понятие устойчивости и, соответственно, неустойчивости определяют по Лагранжу (траектория остается в замкнутой области), Пуассону (траектория многократно возвращается в ε -окрестность стартовой точки) и Ляпунову (две близкие на старте траектории остаются близкими всегда). Если непериодическая траектория устойчива по Пуассону и Ляпунову, то она квазипериодическая. Критерием хаоса является наличие положительного старшего ляпуновского показателя. Если старший показатель нулевой, то это может свидетельствовать или о недостаточности анализа устойчивости по Ляпунову, или о квазипериодичности процесса. Если все показатели отрицательны, то это говорит об асимптотической устойчивости траектории [8]. Например, наши расчеты показали, что для трехплечевой маятниковой системы [11] старший ляпуновский показатель, определенный по алгоритму Бенеттина, положителен и в зависимости от конкретных начальных условий принимает значения от 0,2 до 1,7.

В геомеханических, технических и электродинамических системах возможно возникновение всего многообразия колебаний, в том числе параметрических, феррорезонансных и хаотических. Параметрический механизм колебаний возникает за счет того, что рабочее оборудование, системы охлаждения и другие компоненты постоянно, даже при проектных режимах работы, подвергаются вибрации со стороны вращающихся механизмов (турбины, генераторы, двигатели, насосы, дробилки, мельницы) и перекачиваемой рабочей среды. Особо следует подчеркнуть, что все эти механизмы имеют высокую добротность. Феррорезонансные колебания накладываются на параметрические и срывают их, затем на фоне феррорезонансных колебаний возникают субгармонические (комбинационные) [12].

Область гармонических вынужденных колебаний возникает при низких напряжениях, затем возникают субгармонические колебания и только при высо-

ких напряжениях возникают хаотические неуправляемые колебания. В этом случае под высокими напряжениями как механических конструкций, так и электрических сетей следует понимать не просто их величину, а напряжения, при которых в механической или электрической системах возникают нелинейные эффекты за счет нелинейного изменения каких-либо характеристик системы, а именно, за счет диссипации энергии или волн, гистерезисных или пластических свойств материала, магнитного насыщения, разрушения материала и конструкций и так далее. Поэтому в нелинейных системах колебания зависят не только от их частоты, но и от изменения как механических, так и электрических напряжений.

Как в математических, так особенно в физических приложениях, важной характеристикой гладкой вещественной функции, описывающей (моделирующей) реальный процесс, является наличие у нее «критических точек», в которых производная обращается в нуль. Наиболее распространенные типы критических точек для непрерывных функций – это локальные максимумы и минимумы, но встречаются и более сложные точки – «точки перегиба» [13]. При этом для двух и более переменных задача существенно усложняется благодаря широкому диапазону новых геометрических возможностей. Морс дает определение «хорошим» критическим точкам (устойчивым) для любого числа переменных, распространив затем полученную классификацию на «вырожденные» критические точки (неустойчивые) для случая одной переменной. На основе теории Морса получена важная лемма о расщеплении, с помощью которой в принципе появляется возможность существенно понижать число переменных в решаемых задачах. Морсовские критические точки обладают важным свойством устойчивости, которое интуитивно можно выразить словами «сохранение типа при малых возмущениях». Эти точки обладают определенной окрестностью, в пределах которой изменение управления качественно не оказывает никакого эффекта, иными словами «пока критические точки остаются морсовскими, бифуркации не возникают, а система локально качественно не изменяется» [13].

Таким образом, даже чисто теоретически критерием перехода от регулярной, сложно организованной структуры к хаосу служит ее устойчивость по отношению к малым возмущениям [14]. В настоящее время наиболее простой и доступный способ исследования процессов хаотизации в реальных механических системах и локальных электрических цепях возможен с помощью их физического или компьютерного моделирования, вызывая возмущения в таких моделях генератором детерминированного хаоса.

Эти исследования положены в основу разработки микропроцессорного генератора динамического хаоса, описываемого системой уравнений Лоренца. Такая система является классической, трехмерной, обеспечивает двухпетлевой аттрактор и хорошие спектральные свойства в широком диапазоне изменения параметров. Для обеспечения максимального быстродействия генератора программа выполнена полностью на ассемблере для микроконтроллеров семейства MCS-51/52 и отлажена в оболочке интегрированной инструментальной среды COMPASS 51 IDE.

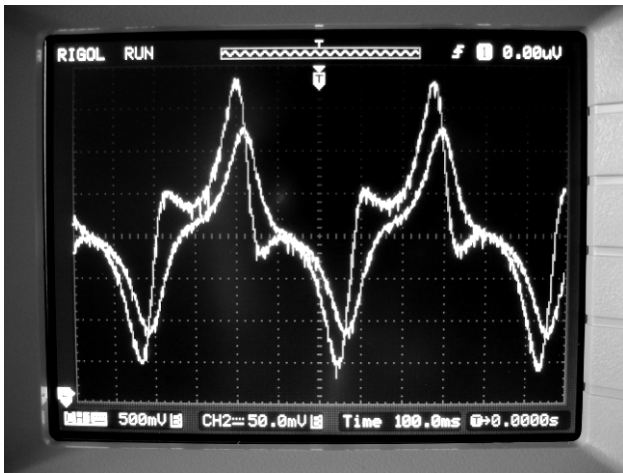
При реализации генератора с помощью микропроцессорных средств наиболее длительными в вычислительном цикле являются операции умножения и деления даже в том случае, когда используется целочисленная арифметика над операндами низкой разрядности. Поэтому для оптимизации программы по времени вычисления предложено выбирать параметрические коэффициенты-множители из области, обеспечивающей хаотический режим функционирования, а шаг интегрирования из ряда чисел 2 в степени $\pm k$, где k – положительное целое число. Произведена замена арифметических операций умножения и деления линейными сдвигами операндов, представленных в двоичном коде, причём число сдвигов равно соответствующей степени кратности.

Одно из возможных применений данного генератора – формирование сигналов с заданными, заранее известными параметрами и ввод их в техническую или электромеханическую системы как возмущающих воздействий по различным технологическим координатам или как сигналов нагрузки. При этом исследуется реакция системы на такие воздействия, характер протекания энергетических процессов, устойчивость, стойкость к повреждениям, надёжность, влияние на сеть и тому подобное. Изготовлены и апробированы экспериментальные образцы генератора. На рис. 3 приведены фотографические отпечатки графиков выходных сигналов разработанного генератора, полученные с помощью цифровых запоминающих осциллографов.

Для сохранения устойчивости сложной механической динамической системы необходим оперативный или непрерывный контроль, который хотя и не всегда позволяет исключить аварийное стечение обстоятельств, но может предупредить об изменениях в системе, а при принятии своевременных экспертных решений – повысить порог ее устойчивости. В идеале возможен учет как всех причинно-следственных связей, так и тенденции накопления случайных повреждений, что необходимо для заблаговременной остановки и ремонта системы.

Принята следующая концепция натурных исследований: 1) проведение сопоставительных измерений на агрегатах с различной степенью износа, но в нормальном режиме их работы; 2) проведение измерений при повышенной, но допустимой нагрузке; 3) проведение измерений на реальных объектах или адекватных моделях, вызывая в них хаотические возмущения с помощью генератора детерминированного хаоса.

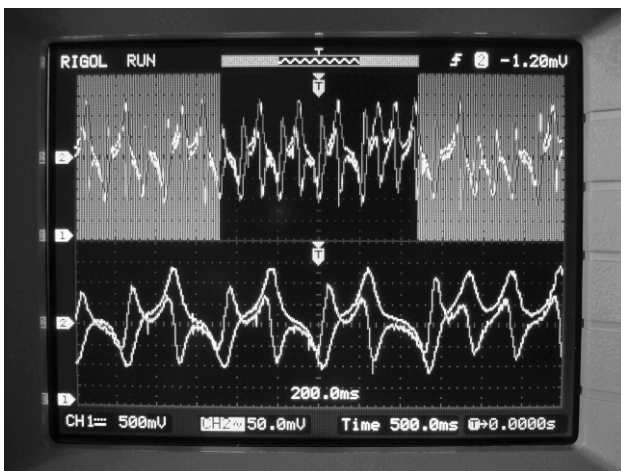
На основе анализа результатов моделирования предложена методика контроля реальных электротехнических объектов, учитывающая поляризацию колебаний в фазовом пространстве. Поскольку хаотические процессы преимущественно характерны для трехмерных структур, часто изменяют направленность колебаний, то их контроль необходимо проводить по взаимно перпендикулярным направлениям двухканальными (многоканальными) системами. Это позволяет обнаруживать возможные фазовые переходы, которые характерны для особо опасного детерминированного хаоса.



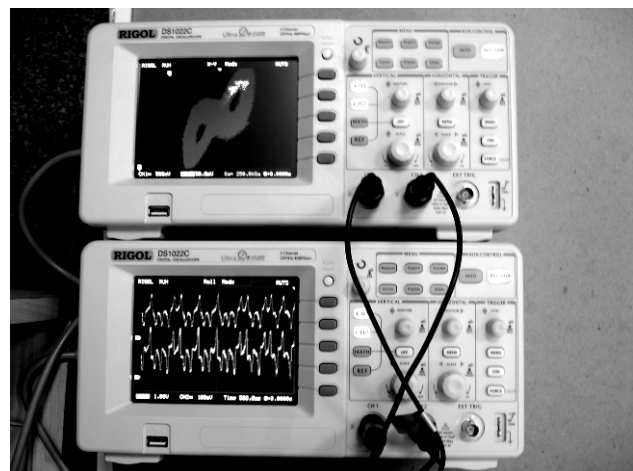
а)



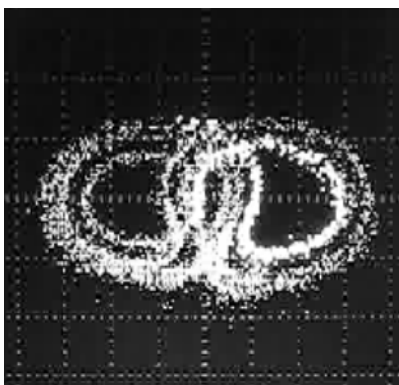
б)



в)



г)



д)

Рис. 3 – Способы отображения сигналов генератора динамического хаоса на экране осциллографа: осциллограммы с разверткой во времени « $x(t)$, $y(t)$ » (а); возвраты Пуанкаре по различным осям (б, в); синхронное отображение сигналов в различных формах на двух осциллографах (г); осциллограммы с параметрической разверткой (д)

В сложных условиях преимущество за непрерывным контролем, однако стоимость его достаточно высокая, контролировать все технологические цепочки практически невозможно. Поэтому важнейшим элементом контроля процессов детерминированного хаоса является спектральный анализ – мощный и универсальный инструмент интегрального изучения технических систем.

Анализ поведения систем в целом, отдельных элементов, а также спектральных характеристик сигналов и функций автокорреляции показывает, что введение нелинейностей приводит к усиленной хаотизации систем: энергия сигналов распределяется более равномерно по всему спектру, автокорреляционная функция приобретает затухающий характер, усиливается чувствительность к начальным условиям. Так, на рис. 4 представлены результаты обработки сигналов координат (x^j) и скоростей (v^j) для последнего в линейной цепочке груза трехмассовой полностью связанной системы пружинных маятников без нелинейности (рисунки в левой колонке) и с нелинейно изменяющейся жесткостью c_{03} (рисунки в правой колонке).

На рис. 4, а приведены автокорреляционные функции сигналов изменения координаты центра массы груза m_3 во времени (последнего груза в цепочке и, в то же время, груза, который непосредственно соединен с нелинейным элементом), где μ – номер точки автокорреляционной функции. Видно, что введение дополнительной нелинейности придает этой функции затухающий характер, таким образом, развитие процесса во времени проходит существенно апериодически. На рис. 4, б стрелками обозначены амплитуды пиков спектрограмм сигналов координат центров масс системы; μ – номер точки дискретного преобразования Фурье. Введение дополнительной нелинейности приводит к расширению частотного состава сигнала и значительному затуханию доминирующих гармоник. На рис. 4, в знаком « $\circ \rightarrow$ » обозначены начальная точка и направление движения груза m_3 вдоль фазовой траектории $x_3 = f(v_3)$. Знаком «+» обозначены конечные точки траектории при малом изменении начальных условий (изменялась начальная координата x_3^0 в пределах $\pm 1\%$). И если в системе без дополнительной нелинейности такое изменение было несущественным, то при наличии нелинейного элемента изменение начальной координаты приводило не только к значительному изменению конечного положения груза (см. знаки «+»), но и к изменению самой траектории с сохранением «зоны притяжения», т. е. аттрактора, рис. 4, в.

Известные исследования областей возбуждения субгармонических и хаотических колебаний, выполненные на эквивалентных моделях реальных электрических схем, показали, что механизмом перехода к сложным неупорядоченным хаотическим колебаниям является механизм перекрытия резонансов – биения [12]. При этом в спектре субгармонических колебаний наблюдаются вторая и третья гармоники. Наши исследования показывают не только на изменения величин резонансных амплитуд при увеличении степени хаотизации системы, но и на «смазывание» частотных характеристик системы.

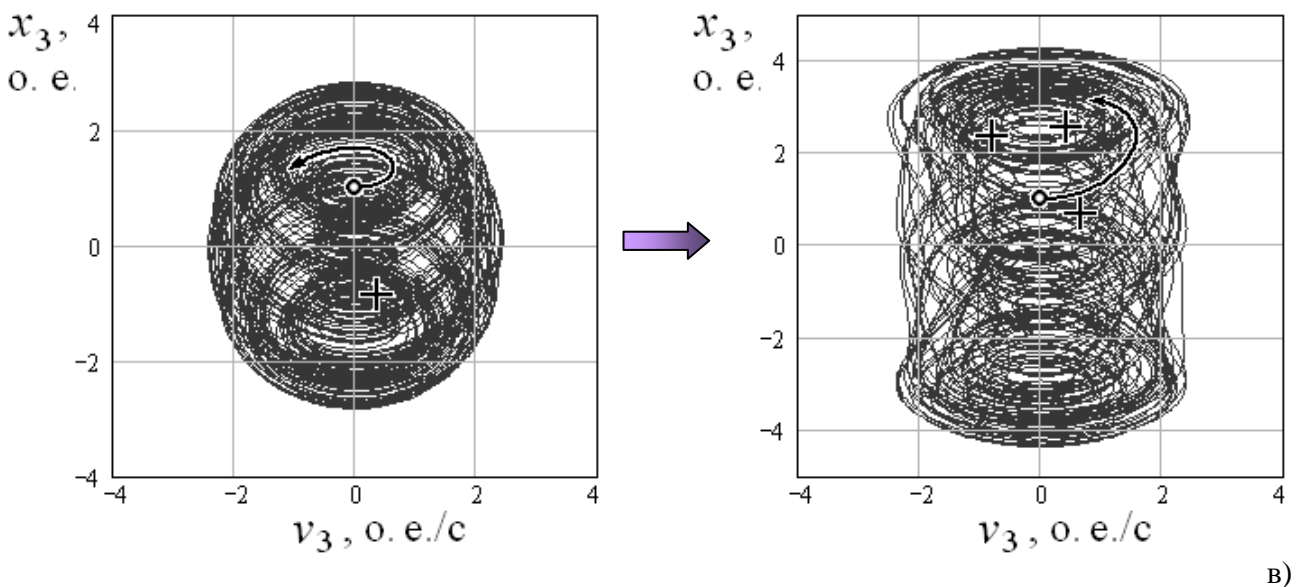
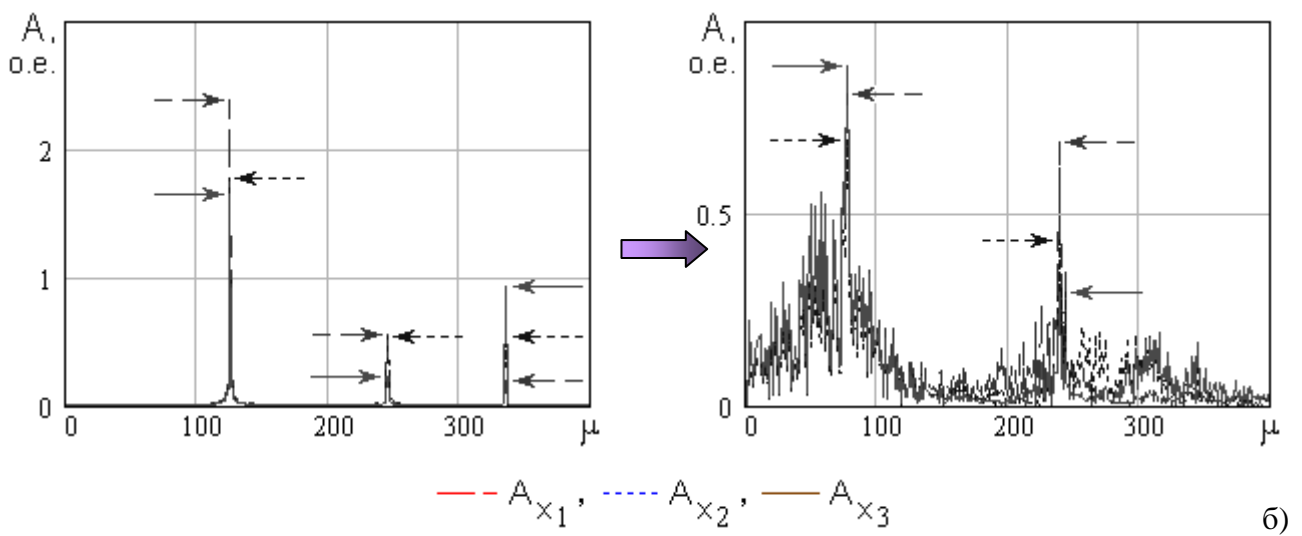
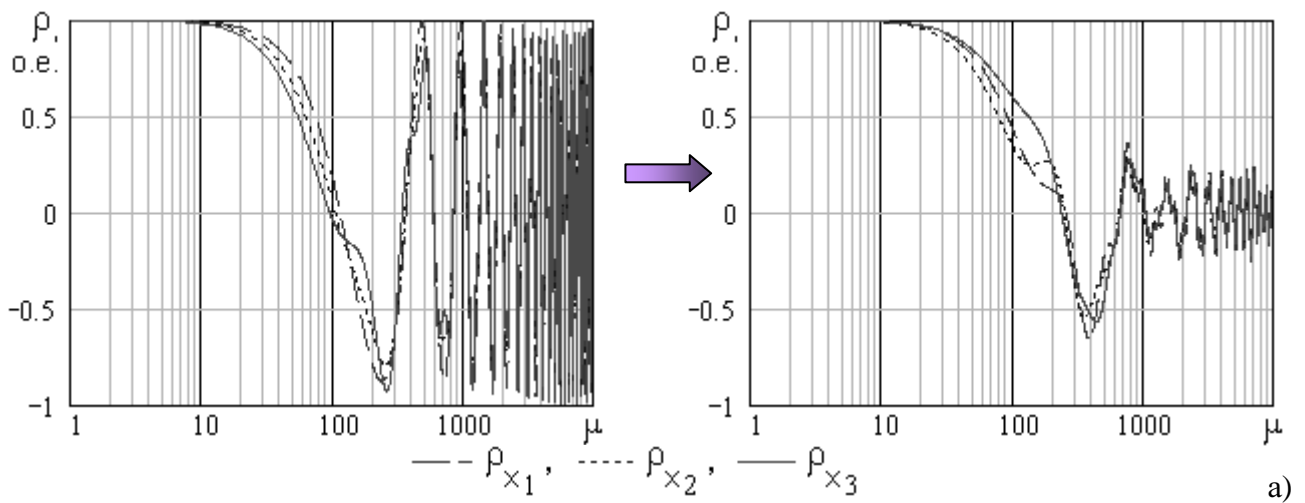


Рис. 4. – Хаотизация полностью связной системы из трех пружинных маятников введением дополнительной нелинейности: а) графики автокорреляционных функций; б) спектрограммы; в) траектории (фазовые портреты)

Усовершенствован, изготовлен и испытан макет экспериментальной системы многопараметрового автоматизированного контроля на основе микроконтроллера, позволяющий производить 8-ми канальный контроль электромеханических устройств в режиме реального времени [15].

Таким образом, отработаны принципиальные положения и создана портативная экспериментальная аппаратура на основе микроконтроллера моделирования и контроля хаотических процессов в горных технических системах, отличающаяся возможностью одновременного изучения и контроля консервативных и диссипативных систем, преобразования консервативной системы в диссипативную и наоборот путем введения или выведения искусственной нелинейности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Федер Е. Фракталы. Пер. с англ. – М.: Мир, 1991. – 254 с.
2. Усаченко Б.М., Паламарчук Т.А., Слащева Е.А. Исследование синергетических и волновых процессов в массиве горных пород // Горный информационно-аналитический бюллетень. – М.: МГГУ, 2000. – № 8. – С. 182-184.
3. Яланский А.А., Паламарчук Т.А., Розумный С.Н. Особенности и диагностика процессов самоорганизации породного массива в окрестности горных выработок // Горный информационно-аналитический бюллетень. – М.: МГГУ, 2003. – № 3. – С.151-154.
4. Булат А.Ф., Дырда В.И. Фракталы в геомеханике. К.: Наук. Думка, 2005. – 357 с.
5. Открытие № 318. Закономерность пространственно-временной структурно-фазовой самоорганизации грунтовых и породных массивов вокруг протяженных подземных выработок / Л.В. Байсаров, М.А. Ильяшов, В.В. Левит, Т.А. Паламарчук, В.Н. Сергиенко, В.Б. Усаченко, А.А. Яланский // Научные открытия, идеи, гипотезы (1992-2007). Информационно-аналитический обзор. – М.: МААНОН, 2008. – С. 298-299.
6. Рабочие поверхности и футеровки барабанных и вибрационных мельниц / Франчук В.П., Настоящий В.А., Маркелов А.Е., Чижик Е.Ф.: Монография. – Кременчуг: Изд-во Щербатых А.В., 2008. – 384 с.
7. Яланский А.А., Яланский Алекс.А., Иконникова Н.А. Моделирование динамики хаотических и синергетических процессов в сложных системах // Геотехническая механика. – Днепропетровск: ИГТМ НАНУ, 2008. – № 78. – С. 163 – 172.
8. Кузнецов С.П. Динамический хаос. – М.: Физматлит, 2001. – 295 с.
9. Фрадков А.Л. Кибернетическая физика: принципы и примеры. – СПб.: Наука, 2003. – 208 с.
10. Горобець Ю.І., Кучко А.М., Вавилова І.Б. Фрактальна геометрія у природознавстві: Навчальний посібник. – К.: Наук. думка, 2008. – 232 с.
11. Иконникова Н.А. Особенности моделирования динамики хаотических процессов в детерминированных системах методами аналитической механики // Геотехническая механика. – Днепропетровск: ИГТМ, 2007. – № 73. – С. 263-280.
12. Золотухин И.А. Анализ колебаний в многоконтурных электрических моделях теплогидравлических систем. Автореф. дис. кандидата технических наук / Московский энергетический институт. – М., 2008. – 19 с.
13. Постон Т., Стюард И. Теория катастроф и ее приложения. / Пер. с англ. – М.: Мир, 1980. – 608 с.
14. Лоскутов А.Ю., Михайлов А.С. Введение в синергетику. – М.: Наука, 1990. – 270 с.
15. Яланский Алекс.А., Иконникова Н.А., Арестов В.В. Приборно-методическое обеспечение оперативного автоматизированного контроля состояния электротехнических систем // Збірник наукових праць національного гірничого університету № 31. – Дніпропетровськ: НГУ, 2008. – С. 173 – 182.