Эргатические системы управления

УДК 681.513

ПРОБЛЕМЫ АНАЛИЗА И СИНТЕЗА СЕТЕЦЕНТРИЧЕСКИХ СИСТЕМ

В.В. Павлов, Ю.М. Шепетуха

Международный научно-учебный центр информационных технологий и систем НАН Украины и МОН Украины

Рассмотрена методология построения сетецентрических структур, основанная на системной интеграции взаимодействующих функционально-операционных сегментов и распределенных прикладных процессов. В дополнение к традиционной классификации человеко-машинных систем управления, действующих в условиях определенности, риска либо неопределенности, предложено также выделять системы, функционирующие при так называемом детерминированном хаосе, когда малые вариации начальных условий порождают принципиально отличные друг от друга фазовые траектории. В этих случаях моделирование прикладных процессов в распределенных функциональных и операционных компонентах сетевых структур позволяет выявить возможные сценарии, описывающие порождение и развитие хаотического поведения, а также исследовать различные варианты восстановления зон организованного состояния сетецентрических систем.

Розглянуто методологію побудови мережецентричних структур, що базується на системній інтеграції взаємодіючих функціонально-операційних сегментів та розподілених прикладних процесів. Доповнюючи традиційну класифікацію людино-машинних систем управління, що діють в умовах визначеності, риску або невизначеності, запропоновано також вирізняти системи, що функціонують за так званого детермінованого хаосу, коли незначні варіації початкових умов породжують принципово відмінні фазові траєкторії. В цих випадках моделювання прикладних процесів у розподілених функціональних і операційних компонентах мережевих структур дозволяє виявити можливі сценарії, що описують породження та розвиток хаотичної поведінки, а також дослідити різні варіанти відновлення організованого стану мережецентричних систем.

Введение

Возникшее в последнее десятилетие и интенсивно развивающееся научное направление, связанное с созданием так называемой сетецентрической (net-centric) концепции и разработкой на ее основе сетецентрических систем, находит все более широкое применение в различных областях деятельности человека. Технической основой создания сетецентрических систем являются современные компьютерные и коммуникационные технологии, используемые для формирования интегрированного информационного пространства, позволяющего моделировать и исследовать в реальном масштабе времени распределенные функциональные и операционные компоненты сложных прикладных процессов. Так, в настоящее время имеет место все более широкое использование сетецентрического подхода для решения различных задач оперативного анализа ситуации, планирования и осуществления эффективных действий по управлению динамическими объектами различной природы. На смену вертикально организованным иерархическим системам управления постепенно приходят более гибкие горизонтальные сетевые структуры, что позволяет получать своевременный доступ ко всей необходимой информации, достаточно быстро адаптироваться к постоянно изменяющимся условиям внешней среды и, как следствие этого, принимать более взвешенные, скоординированные и быстрые управляющие решения даже в ситуациях повышенной сложности.

Постановка задачи. Формирование единого информационного пространства дает возможность эффективно координировать, структурировать и интегрировать распределенные в пространстве и времени компоненты информации и знаний, а также других видов ресурсов — с целью создания целостных систем распределенного интеллектуального управления. При этом отдельные локальные элементы системы распределенного управления могут, в свою очередь, описываться достаточно сложными нелинейными математическими моделями. Необходимо отметить, что в данной работе мы не рассматриваем модели физических, химических, биологических процессов, а исключительно модели информационных процессов. Поэтому отдельные функциональные и операционные компоненты интегрированной системы характеризуются некоторыми прикладными процессами преобразования информации, задаваемыми с помощью тех или иных математических моделей, например дискретных отображений, разностных соотношений, дифференциальных уравнений и т.д. Под термином «сеть» будем понимать системную организацию совокупности прикладных процессов и их информационных моделей, определенным образом распределенных как во времени, так и в пространстве. Тогда вышеуказанные математические модели задают не только текущее состояние сети, но и динамические характеристики как всей системы, так и отдельных ее компонентов — прикладных процессов. Такие прикладные процессы могут, в свою очередь, быть линейными либо нелинейными, непрерывными либо дискретными, сосредоточенными либо распределенными, консервативными либо диссипативными.

Каждый из локальных функционально-операционных сегментов характеризует определенный прикладной процесс переработки информации, который может описываться достаточно сложными соотношениями. Например, в [1] приведено следующее выражение для анализа устойчивости поведений оптического резонатора, описываемого сравнительно простой системой дифференциальных уравнений с временными задержками:

$$\|\Gamma_1(t)\| = \|\exp\{\int_{t_{j-1}}^{t}[-2(\lambda + Kj - |m_1|/2) + \vartheta|m_1|]ds\}\ldots\times$$
$$\times\exp\{\int_{t0}^{t1}[-2(\lambda + Kj - |m_1|/2) + \vartheta|m_1|]ds\}V_0\| \le$$
$$\exp\int_{t_{j-1}}^{t}[-2(\lambda + Kj - |m_1|/2) + |m_1|]ds\}\ldots\times$$
$$\times\exp\{\int_{t0}^{t1}[-2(\lambda + Kj - |m_1|/2) + |m_1|]ds\}V_0,$$

где $\Gamma_1(t)$ — функция, ограничивающая сверху соответствующую функцию Ляпунова, $t_0, t_1, \ldots, t_{j-1}, \ldots$ — моменты переключения резонатора, λ — коэффициент релаксации, Kj — коэффициент связи, ϑ — расчетный параметр, m_1 — величина входного сигнала, V_0 — начальное значение функции Ляпунова. Но значительно более сложные и трудно предсказуемые явления возникают при взаимодействии этих локальных функционально-операционных сегментов. В таких случаях может иметь место совместное действие различных нелинейных эффектов, например переходы некоторой совокупности сегментов из упорядоченных состояний в хаотические, а также переходы из одних видов хаотических состояний в другие.

Цель работы — разработка концептуальных аспектов построения сетецентрических структур, а также систематизация возможных подходов к исследованию процессов взаимодействия и системной интеграции функционально-операционных сегментов в сетях высокой размерности и сложной конфигурации. Методологической основой работы являются общая теория систем, теория конфликтов, теория нелинейной инвариантности, теория возникновения хаотических процессов в нелинейных системах, теория синхронизации и управления хаосом.

Особенности сетей высокой размерности

Специфической чертой нелинейных прикладных процессов преобразования информации в сетях высокой размерности является эффект возникновения так называемого детерминированного хаоса. Как показывает опыт, сеть сложной конфигурации, характеризуемая нелинейными соотношениями, сравнительно редко находится в полностью упорядоченном или полностью хаотическом состояниях. Как правило, ее текущее состояние является промежуточным, при этом соотношение между упорядоченными и хаотическими функционально-операционными сегментами непрерывно меняется как во времени, так и в пространстве. Это означает, что некоторые компоненты сети могут со временем переходить из упорядоченного в хаотическое состояние и обратно, а динамика таких изменений может задаваться различными типами соотношений, как правило нелинейных. Другими словами, имеют место процессы изменения во времени и пространстве границ между хаотическими и организованными зонами многомерной глобальной нелинейной системы. Это приводит к непрерывному изменению структуры подобной нелинейной системы за счет появления, видоизменения, слияния и ликвидации локальных зон, соответствующих хаотическим и организованным состояниям. Кроме того, такая система может также включать в себя человека, что делает возникающие нелинейные интерактивные процессы преобразования информации явлениями еще более сложными, а траектории будущего развития глобальной системы еще более трудно предсказуемыми, особенно в условиях реального времени.

КЛАССИФИКАЦИЯ СИСТЕМ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОГО УПРАВЛЕНИЯ

Принципиально возможным является эффект возникновения хаоса в системе, динамика которой задается детерминированными соотношениями, такими как нелинейные дифференциальные уравнения, не содержащие стохастических компонентов. Поэтому представляется целесообразным модифицировать традиционную классификацию [2] моделей поведения в человеко-машинных системах управления (пункты (а)–(в)) и разграничивать следующие типы систем:

(а) действующие в условиях полной определенности — задающие поведение системы математические соотношения не содержат стохастических компонентов и позволяют точно определить траекторию ее будущего поведения;

(б) действующие в условиях вероятностных оценок и риска — характеризующие поведение системы соотношения содержат один или несколько стохастических компонентов, что позволяет определить вероятностные зависимости для возможных траекторий будущего поведения данной системы;

(в) действующие в условиях неопределенности и слабой структурированности — например, могут быть известны лишь интервалы значений некоторых параметров, могут быть вообще неизвестны точные математические соотношения для описания отдельных элементов системы или их существенных взаимосвязей;

(г) действующие в условиях детерминированного хаоса — задающие поведение системы соотношения являются полностью детерминированными, не содержат стохастических компонентов, но при определенных условиях приводят к возникновению в системе хаотических явлений.

Прикладные процессы, происходящие в системе типа (г), характеризуются тем, что даже незначительные вариации их начальных условий по истечении определенного интервала времени могут порождать принципиально отличные друг от друга фазовые траектории. Подобная гиперчувствительность к начальным условиям является специфической особенностью большинства локальных элементов сложных распределенных систем. Во многих интересных практических случаях переход к хаосу достигается путем изменения в определенных пределах некоторых параметров модели, задающей алгоритмы преобразования информации в данной системе. Вообще говоря, одной из основных проблем, возникающих при исследовании хаотических процессов, является, во-первых, определение набора существенных параметров $\{p_1, p_2, ..., p_n\}$, влияющих на изменение фазовых траекторий данной системы и, во-вторых, анализ процессов формирования хаоса при изменении значений этих параметров в определенных пределах. При этом сам переход от обычного состояния к хаосу характеризуется рядом характерных явлений, имеющих фундаментальное значение для понимания нелинейных прикладных процессов, таких как устойчивые колебания между двумя размерами — большим и меньшим, а также каскадное удвоение периода для широкого класса одномерных процессов [3]. Поэтому важным аспектом исследования и проектирования сетецентрических систем является проведение количественного и качественного анализа влияния изменения таких параметров на различные варианты развития сценариев, при которых происходит переход от организованного состояния системы к хаосу.

ТИПИЧНЫЕ СЦЕНАРИИ ПОРОЖДЕНИЯ ХАОСА

Следует также отметить, что процессы порождения хаоса развиваются в соответствии со сравнительно небольшим числом стандартных сценариев, мало зависящих от конкретной системы [3], а сами хаотические поведения динамической системы характеризуются определенными видами фазовых траекторий. Поэтому важным вопросом анализа и синтеза сетецентрических структур является систематизация типичных сценариев порождения хаоса и исследование всего набора характерных для хаотических явлений функциональных и операционных компонентов. Эти типичные сценарии и характерные функционально-операционные компоненты могут служить элементами, из которых может быть построена сетецентрическая система значительно более сложной конфигурации. Выбор таких элементов должен отвечать двум противоречивым требованиям. Во-первых, они должны охватывать существенные составляющие происходящих в сети прикладных процессов обработки информации. Во-вторых, эти процессы не должны описываться чрезмерно громоздкими выражениями. Кроме того, желательно, чтобы данные функционально-операционные компоненты давали возможность формировать графические образы, позволяющие визуализировать отдельные составляющие сценариев формирования хаоса.

Важным практическим примером визуализации нестабильных периодических фазовых траекторий, характерных для хаотических явлений в детерминированных нелинейных динамических системах, являются спиралевидные кривые Лоренца. Динамическая система, описываемая уравнениями Лоренца [4], представляет собой модель конвекционного потока с тремя переменными состояния. Переменная $x(t)$ характеризует скорость движения потока некоторой жидкости, а переменные $y(t)$ и $z(t)$ представляют собой пространственное распределение температур в слоях этой жидкости.

Уравнения Лоренца представляют собой три обыкновенных дифференциальных уравнения, два из которых содержат нелинейные члены (произведения переменных):

$$\begin{aligned} &\dot{x} = ax - ay, \\ &\dot{y} = bx - y - zx, \\ &\dot{z} = cz + xy, \end{aligned} \tag{1}$$

где $x = x(t), y = y(t), z = z(t)$ — дифференцируемые функции, a, b, c — числовые параметры.

Для качественного анализа системы уравнений Лоренца необходимо определить поведение системы вблизи критических точек, т.е. точек, в которых производные функций $x(t), y(t), z(t)$ обращаются в нуль. В наиболее общем случае система нелинейных дифференциальных уравнений (1) имеет три набора критических точек:

$$\begin{aligned} &x_{1crit} = 0, y_{1crit} = 0, z_{1crit} = 0, \\ &x_{2crit} = -\sqrt{c(1-b)}, y_{2crit} = -\sqrt{c(1-b)}, z_{2crit} = b-1, \\ &x_{3crit} = \sqrt{c(1-b)}, y_{3crit} = \sqrt{c(1-b)}, z_{3crit} = b-1. \end{aligned} \tag{2}$$

При этом одна из критических точек, которая существует при любых значениях числовых параметров, находится в начале координат. Очевидно, что вторая и третья критические точки существуют только при выполнении соотношения $b < 1$. При $b = 1$ все три критические точки сливаются воедино.

Для исследования свойств и визуализации фазовых траекторий вблизи критических точек целесообразно использовать подход, основанный на локальной линеаризации системы нелинейных уравнений (1) и последующем определении корней соответствующего характеристического полинома. В зависимости от конкретных числовых значений параметров a, b, c возможны следующие четыре качественно различных типа функциональных поведений системы:

— фазовые траектории системы асимптотически приближаются к началу координат,

— фазовые траектории системы асимптотически приближаются к точке

$$x_{2crit} = -\sqrt{c(1-b)}, y_{2crit} = -\sqrt{c(1-b)}, z_{2crit} = b-1,$$

— фазовые траектории системы асимптотически приближаются к точке

$$x_{2crit} = \sqrt{c(1-b)}, y_{2crit} = \sqrt{c(1-b)}, z_{2crit} = b-1,$$

— фазовые траектории образуют специфические двухлепестковые спиралевидные линии (называемые кривыми Лоренца), удаляясь от всех критических точек, но в то же время оставаясь в пределах некоторой ограниченной области фазового пространства.

Следует отметить, что даже сравнительно простая система уравнений (1) не решаема в квадратурах, т.е. невозможно получить общее решение этой системы дифференциальных уравнений в виде аналитических выражений и неопределенных интегралов. Поэтому человек, взаимодействующий с прикладными процессами, которые описываются подобными системами дифференциальных уравнений, не может представлять себе обобщенные визуальные образы происходящих в системе явлений. До настоящего времени эвристический метод перебора возможных вариантов является основным практическим средством решения возникающих проблем. В некоторых случаях этот метод позволяет получить ценные для практических приложений результаты.

Как уже говорилось выше, важной практической задачей при построении сетецентрических систем является определение таких функционально-операционных компонентов, которые, с одной стороны, отражают существенные качественные характеристики исследуемых прикладных процессов, а с другой стороны, являются максимально упрощенными и пригодными для анализа моделями этих процессов. Так, уравнения Росслера [5]

$$\begin{aligned} \dot{x} &= -y - z, \\ \dot{y} &= x + dy, \\ \dot{z} &= e + z(x - f), \end{aligned} \tag{3}$$

где d, e, f — числовые параметры, представляют собой упрощенную модель рассмотренных выше классических уравнений Лоренца. В отличие от уравнений Лоренца, содержащих два нелинейных члена второго порядка, уравнения Росслера содержат единственный нелинейный член — произведение переменных в правой части третьего уравнения. Как результат, двухлепестковые спирали Лоренца превращаются в однолепестковые спирали Росслера. Соответствующее этим спиралям хаотическое поведение системы выражается в эффекте «растяжения» и «свертывания» ее фазовых траекторий.

Важной чертой систем уравнений Лоренца и Росслера является их сильная чувствительность к незначительным изменениям параметров. Это приводит к тому, что численные методы решения могут приводить к существенно различным результатам, например, в зависимости от выбора шага дискретизации. До настоящего времени эвристический метод подбора приемлемого шага дискретизации является наиболее часто встречающимся на практике подходом к количественному анализу влияния существенных параметров на варианты развития хаотических явлений в системе.

АЛГОРИТМЫ УПРАВЛЕНИЯ ХАОСОМ

Процесс перехода от упорядоченного состояния к хаотическому приводит к появлению так называемых деградированных зон, исследование которых представляет большой интерес. Также актуальными являются проблемы анализа и систематизации типичных механизмов обратного перехода. Такая трансформация от хаотического к организованному состоянию системы может возникнуть либо в результате самовосстановления деградированных зон, либо в результате целенаправленного действия механизмов управления хаосом. Разработанные до настоящего времени подходы к управлению хаосом основаны на принудительной стабилизации фазовых траекторий системы путем ввода в нее небольших возмущающих воздействий. Эти возмущающие воздействия поступают на вход системы либо непрерывно, либо дискретно (в точно определенные моменты времени) — так называемый OSG-метод дискретного управления хаотическими явлениями. В связи с важностью обоих подходов для выявления и систематизации качественно характерных функциональных и операционных компонентов прикладных процессов в сетецентрических системах высокой размерности и сложной конфигурации, рассмотрим их основные положения более подробно.

Основная идея метода непрерывного управления хаосом [6] заключается в формировании такого непрерывного возмущающего воздействия, которое существенно не влияет на вид нестабильных периодических фазовых траекторий, но позволяет осуществить их стабилизацию. Такое переменное по величине воздействие может как вводиться извне, так и формироваться внутри самой динамической системы с использованием принципа обратной связи.

Пусть рассматривается динамическая система, характеризуемая системой обыкновенных дифференциальных уравнений в векторной форме:

$$\dot{y} = P(y, X) + F(t), \tag{4}$$

где y — измеряемая выходная переменная системы, $X = \{x_1, x_2, ..., x_n\}$ — вектор неизмеряемых выходных переменных системы, $F(t)$ — действующее на систему переменное во времени возмущающее воздействие. Предполагается, что в отсутствие возмущающего воздействия множество Ω, ограничивающее фазовые траектории исследуемой системы, представляет собой странный аттрактор. При этом выходной сигнал $y_i(t) = y_i(t + T_i) \subset \Omega$ соответствует i-й периодической траектории с периодом T_i. Таким образом, данный метод требует предварительного определения всей совокупности нестабильных периодических траекторий динамической системы. Только после завершения этого этапа можно выбрать ту конкретную траекторию, которая будет стабилизироваться.

В случае когда возмущающее воздействие вводится в систему извне, его величина задается соотношением:

$$F(t) = K[y_i\{t) - y(t)], \tag{5}$$

где K — экспериментально определяемый весовой коэффициент управляющего воздействия. Важной положительной чертой данного метода является то, что возмущающее воздействие не влияет на решение уравнения (4), соответствующее траектории $y(t) = y_i(t)$. После решения задачи стабилизации величина выходного сигнала $y(t)$ будет достаточно близка к величине сигнала $y_i(t)$ и, следовательно, возмущающее воздействие $F(t)$ будет достаточно малым. Автору не удалось строго доказать применимость предлагаемого им метода в общем случае, но была экспериментально подтверждена его эффективность в некоторых важных частных случаях, например для стабилизации динамической системы, задаваемой вышеуказанными уравнениями Росслера. Поэтому его можно рассматривать в качестве типичного функционально-операционного сегмента базы знаний о свойствах прикладных процессов в сетецентрических системах сложной конфигурации.

Управление хаосом с помощью OSG-метода [7] во многом аналогично традиционным дискретным алгоритмам управления с использованием механизма обратной связи. Характерными особенностями метода, определяющими его применимость для решения практических задач, например для стабилизации элементов информационных сетей, задаваемых моделями дискретных преобразований, являются следующие положения: величина управляющего сигнала связи пропорциональна разнице между текущим и желаемым фазовыми состояниями; управляющий сигнал формируется в момент времени, когда нестабильные периодические фазовые траектории пересекают некоторые фиксированные поверхности фазового пространства; координаты вышеуказанных точек пересечения должны быть предварительно определены экспериментальным путем.

Взаимодействие прикладных процессов в сетецентрической системе

Таким образом, отдельные сегменты прикладных процессов в сетецентрической системе сложной конфигурации могут моделировать переходы из организованного в хаотическое состояние и обратно. Для понимания динамических свойств многомерной системы необходимо исследовать также процессы взаимодействия между распределенными во времени и пространстве сегментами прикладных процессов. Поэтому в последнее десятилетие возникло новое перспективное направление в области анализа прикладных процессов — синхронизация фазовых траекторий двух взаимосвязанных нелинейных динамических систем — ведущей и ведомой. Так, в работе [8] показано, что диссипативная хаотическая система с временной задержкой в цепи обратной связи может влиять на поведение другой системы таким образом, что возникает синхронизация будущих траекторий этих систем. Другими словами, ведущая система

$$\begin{gathered} \dot{x} = ax + f(x_\tau), \\ \{x \in R, x_\tau = x(t-\tau)\}, \end{gathered} \tag{6}$$

порождает поведение ведомой системы, задаваемое соотношением

$$\dot{y} = -ay + f(x), \{y \in R\}, \tag{7}$$

где $x = x(t), y = y(t), f(t)$ — дифференцируемые функции, a, b, τ — числовые параметры.

При этом в момент времени t ведомая система (7) синхронизируется с будущим состоянием ведущей системы (6) в момент $t+\tau$, т.е. ведомая система может предсказывать будущее поведение ведущей системы. Данное свойство является инвариантным не только по отношению к виду функции f, но и по отношению к величине задержки времени τ, что принципиально позволяет предвидеть будущее поведение сегментов хаотических систем высокой размерности на произвольно больших интервалах времени. Отметим, что синхронизация траекторий принципиально возможна даже в том случае, когда сегменты прикладных процессов, во-первых, находятся на достаточно большом расстоянии друг от друга, и, во-вторых, обмен информацией между ними является не только двунаправленным, но и однонаправленным.

Следует подчеркнуть, что вышеописанный эффект синхронизации отдельных сегментов прикладных процессов является возможным и для хаотических систем без временной задержки. Однако в этом случае имеет место то ограничение, что максимально достижимое время достоверного предсказания становится достаточно коротким и соизмеримым с интервалами времени переходных процессов. Рассмотрим, например, динамическую систему [9], задаваемую следующим дифференциальным уравнением для вектора состояния X:

$$\dot{X} = F(X), \{X \in R_n,\}. \tag{8}$$

Пусть также имеется сопряженная динамическая система, поведение которой задается следующим дифференциальным уравнением для вектора состояния *Y*:

$$\dot{Y} = F(Y) + K(X - Y), \{Y \in R_n,\}. \tag{9}$$

Тогда система (8) является ведущей системой, а система (9) — ведомой. Уравнение для вектора состояния $\Delta = X - Y$ запишется в виде

$$\dot{\Delta} = F(X) - f(Y) + K(\Delta), \{\Delta \in R_n,\}. \tag{10}$$

Можно показать, что если функция K является линейной, функция F — полиномом не выше второго порядка, а фиксированная точка $\Delta = 0$ является глобально асимптотически устойчивой, то ведущая и ведомая системы проявляют синхронное поведение по истечению некоторого времени переходного процесса.

Выводы

Сетецентрическая концепция основывается на системной интеграции совокупности взаимодействующих функционально-операционных сегментов и распределенных прикладных процессов. При этом необходимо принимать во внимание постоянное изменение границ между хаотическими и организованными зонами сложной системы.

В дополнение к традиционной классификации моделей поведения в человеко-машинных системах управления (действия в условиях определенности, риска, неопределенности) целесообразно выделить также системы, функционирующие при так называемом детерминированном хаосе.

Важным аспектом исследования сетецентрических систем является выявление и систематизация качественно характерных функциональных и операционных сегментов, осуществляющих процесс обработки внутренних и внешних информационных потоков. Свойства каждого из подобных сегментов определяются некоторыми модельными представлениями, например разностными соотношениями или дифференциальными уравнениями.

Анализ прикладных процессов в распределенных сетевых структурах позволяет исследовать различные модели, описывающие порождение и развитие хаотического поведения системы:

— модели дискретных преобразований;

— модели конечномерного фазового пространства, описываемые системами обыкновенных дифференциальных уравнений (системы уравнений Лоренца, Росслера и др.);

— модели бесконечномерного фазового пространства, задаваемые системой обыкновенных дифференциальных уравнений с запаздыванием (системы уравнений Икеды и др.).

Принципиальным вопросом исследования и проектирования сетецентрических систем является также решение обратной задачи — анализ процесса перехода от хаотических к детерминированным фазовым траекториям. Такой обратный переход можно осуществить с помощью алгоритмов модификации существенных параметров модели, описывающей динамику преобразования информации для данной системы.

1. Chen M., Kurths J. Synchronization of time-delayed systems. *Physical Review E*, 2007, vol. 76, pp. 036212-1–036212-5.
2. Шеридан Т.Б. Системы «человек-машина» / Т.Б. Шеридан, У.Р. Феррелл. — М. : Машиностроение, 1980. — 400 с.
   Sheridan T.B., Ferrell W.R. *Man-machine systems*. Moscow: Mashinostroyeniye, 1980. 400 p.
3. Мандельброт Б. Фрактальная геометрия природы / Б. Мандельброт — М. : Ин-т компьютерных исследований, 2002. — 656 с.
   Mandelbrot B. *Fractal geometry of nature*. Moscow: Institute for space studies, 2002. 656 p.
4. Lorenz E.N. Deterministic nonperiodic flow. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 1963, vol. 20, no. 2, pp. 130–141.
5. Rossler O.E. An equation for continuous chaos. *Physics Letters A*, 1976, vol. 57, no. 2, pp. 397–398.
6. Pyragas K. Continuous control of chaos by self-controlling feedback. *Physics Letters A*, 1992, vol. 170, pp. 421–428.
7. Ott E., Gregory C., Yorke J.A. Controlling chaos. *Physics Review Letter*, 1990, vol. 64, pp. 1196–1199.
8. Voss H.U. Anticipating chaotic synchronization. *Physical Review E*, 2000, vol. 61, no. 5, pp. 5115–5119.
9. Voss H.U. Dynamic long-term anticipation of chaotic states. *Physical Review Letters*, 2001, vol. 87, no. 1, pp. 014102-1–014102-4.

Получено 14.11.2013