

## ХАОТИЧЕСКИЕ И ДЕТЕРМИНИРОВАННЫЕ ПРОЦЕССЫ В КРУПНОМАСШТАБНЫХ СИСТЕМАХ

**Петров Л.Ф.**

*Российский экономический университет им. Г.В. Плеханова, Москва, Россия*

Petrov.LF@rea.ru, lfp@mail.ru

*Аннотация. Рассматриваются хаотические и детерминированные процессы в крупномасштабных системах с точки зрения проявления эффектов нелинейной динамики. Обсуждаются некоторые нелинейные динамические эффекты в крупномасштабных системах, имеющие аналогии в простых нелинейных динамических системах с хаотическими и сложными детерминированными режимами.*

*Ключевые слова: крупномасштабные системы, нелинейные эффекты, хаотические процессы.*

### **Введение**

При построении математических моделей планирования, функционирования и управления крупномасштабными системами возникает вопрос о выборе вида модели и уровне ее детализации. Наряду с классическими подходами [1], известны модели на основе нелинейной динамики [2,3]. В реальных крупномасштабных системах присутствует неустранимая хаотическая составляющая. Математические модели нелинейных динамических систем небольшой размерности позволяют получить качественное и количественное соответствие результатов моделирования и поведения исходной системы. При этом возможно количественно исследовать разнообразные детерминированные и хаотические режимы, поведение системы на границе хаос-порядок.

Для крупномасштабных систем подходы на основе нелинейной динамики позволяют получить лишь качественное, но не количественное совпадение результатов моделирования и поведения реальной системы. Но нельзя не обратить внимание на общность проявлений некоторых нелинейных динамических эффектов в динамических системах небольшой размерности и крупномасштабных системах. Мы будем рассматривать особенности поведения и управления крупномасштабными системами с учетом нелинейных эффектов и, быть может, наличия хаотической составляющей в динамике системы.

### **1. Нелинейная динамика как инструмент моделирования крупномасштабных систем**

Одним из традиционных направлений построения математических моделей крупномасштабных систем является использование нелинейных динамических моделей. Классическим примером такого подхода является модель мировой динамики Дж. Форрестера [2,3]. Методология нелинейной динамики позволяет на основе объективных законов исследовать разнообразные динамические системы различного уровня сложности – от механических до крупномасштабных. Нелинейные эффекты проявляются в системах любого уровня – от простейших до крупномасштабных [3,4]. Среди таких эффектов можно выделить [5]:

- Отсутствие принципа суперпозиции
- Возможность существования нескольких устойчивых состояний
- Взаимосвязь амплитуды и частоты колебаний
- Существование различных устойчивых и неустойчивых динамических режимов при одинаковых параметрах системы и (или) внешнего воздействия
- Существование высокочастотных и низкочастотных колебаний
- Возможность реализации устойчивых автоколебаний с ограниченной амплитудой
- Возможность мягкого и жесткого самовозбуждения автоколебаний
- Эффект захватывания частоты
- Синхронизация слабосвязанных динамических систем
- Нелинейное взаимодействие разных динамических процессов
- Бифуркации решений при изменении параметров системы и (или) внешнего воздействия
- Постбифуркационные эффекты - появление новых решений, переход от неустойчивых состояний к устойчивым и обратно
- Скачкообразные изменения поведения системы при плавном изменении условий
- Существование в нелинейных моделях как относительно простых решений, так и сложных устойчивых и неустойчивых полигармонических режимов

- Хаотическое поведение как одна из форм решений нелинейной детерминированной системы.
- Странный аттрактора – устойчивое многообразие неустойчивых траекторий внутри ограниченной области фазового пространства
- Бифуркации удвоения периода как один из возможных сценариев перехода к хаосу
- Эффект самоорганизации - возникновение упорядоченных структур из беспорядочной организации

Для простейших систем обнаруженные при моделировании нелинейные эффекты получили количественное подтверждение в физических и натуральных экспериментах [6], для сложных систем, в том числе и крупномасштабных, эти эффекты имеют качественные аналогии в результатах моделирования и поведении реальных систем [7]. Решение достаточно простой нелинейной системы может быть сложным – полигармоническим или хаотическим [8]. Можно ожидать, что нелинейная система с большим числом степеней свободы, крупномасштабная система в большей мере должна быть склонна к хаотическому поведению [8,10]. В реальных крупномасштабных системах присутствуют и упорядоченные, и хаотические движения.

Разнообразные аспекты построения математических моделей управления крупномасштабными системами представлены как детерминированными моделями и алгоритмами [11], так и подходами, учитывающими нелинейные эффекты в крупномасштабных системах, в том числе хаотическое и детерминированное поведение [12,13].

Рассмотрим качественные проявления отдельных нелинейных эффектов для некоторых крупномасштабных систем.

## 2. Синхронизация в крупномасштабных системах

Математические модели синхронизации простых систем [14] (совокупность математических маятников, система «Земля-Луна» и т.п.) позволяют получить не только качественные, но и количественные результаты, совпадающие с физическими процессами. Модели синхронизации в крупномасштабных системах позволяют проводить качественный, но не количественный анализ.

Эффект толпы [13], когда сообщество людей под действием объединяющего фактора (связь) ведет себя не так, как ведут себя отдельные, не связанные фактором и ситуацией, люди в тех же условиях, можно отнести к проявлению синхронизации.

Синхронизация в социуме может быть реализована за счет связей двух видов – экономических и не экономических.

### 2.1. Синхронизация в социуме, не связанная с экономическими факторами

«Бурные, продолжительные аплодисменты, переходящие в овацию» - синхронизация движений рук людей, которые слышат и видят друг друга. Из хаоса отдельных хлопков зарождается синхронизированное упорядоченное периодическое движение - овация. Синхронизирующая связь – акустическая,

Экономическая составляющая в большинстве реализаций перехода аплодисменты- овация не участвует (за исключением, быть может, ситуаций, когда аплодисменты возникают в связи с выступлением руководителя присутствующих, когда пассивное участие в действе может иметь экономические последствия). Синхронное поведение фанатов (фолловеров) артистов или спортивных болельщиков также не связано с экономическими отношениями и реализуется под влиянием внешнего воздействия – событий на сцене или арене. Если на процесс перехода аплодисментов в овацию влияют клакеры, то, возможно, добавляются экономические факторы.

### 2.2. Синхронизация в социуме, определяемая экономическими факторами

Мода – синхронизированное отношение потребителей к товару или услуге. Часто возникает за счет связей, формируемых рекламой или средствами массовой информации. Производители товаров и услуг, продвигаемых за счет моды, прямо или косвенно оплачивают формирование связей в обществе, формирующих позитивное отношение к рекламируемому товару (услуге). Феномен моды появился гораздо раньше, чем технические средства передачи информации, поэтому для формирования феномена синхронизации типа «мода» достаточно относительно слабых связей в социуме, не поддерживаемых техническими средствами. Отметим, что в обществе иногда возникают феномены синхронизации на некоммерческой основе – на основе интереса к здоровому образу жизни, спорту, искусству и т.п. Однако возможно появление участников, которые постараются монетизировать этот интерес. Садовое некоммерческое товарищество в своем названии закрепляет синхронизацию деятельности любителей садоводства на некоммерческой основе, однако оно вынуждено вступать в

экономические отношения с окружающей крупномасштабной системой. Интерес в интернет-сообществах к отдельным темам порождает синхронизацию участников и появление блогеров, монетизирующих этот интерес.

Еще одним примером синхронизации людей на коммерческой основе является поведение участников фондового рынка, не обладающих инсайдерской информацией. Наиболее заметно эта синхронизация проявляется в периоды экономических кризисов. Связью является стремление избежать убытков и общедоступная информация.

Синхронизация экономических систем - естественное явление. Связью является торговый обмен и(или) использование единой валюты. Разрыв экономических связей исключает или приводит к ослаблению экономической синхронизации.

При полном устранении экономических связей синхронизация не может реализоваться, возможна ситуация, когда одна экономика (отрасль) переживает кризис, а другая – подъем. Железный занавес – лучшее средство от экономической синхронизации.

### **3. Детерминированные и хаотические процессы в крупномасштабных системах**

В некотором смысле антиподом синхронизации является хаотическое состояние системы – от относительно простых нелинейных динамических систем небольшой размерности до крупномасштабных. При этом выделяются два принципиально разных источника возникновения хаоса – наличие стохастической компоненты в самой системе и детерминированный хаос – хаотическое поведение полностью детерминированной системы. Рассмотрим подробнее возникновение хаоса в детерминированной системе.

Первоначально в детерминированных системах предполагалось детерминированное решение. Но в относительно простой нелинейной динамической модели - аттракторе Лоренца [15] - было обнаружено хаотическое поведение решения. Позднее появились другие детерминированные модели нелинейной динамики, в которых также в некоторых диапазонах параметров обнаружено нерегулярное поведение решения [4, 8]. Сейчас можно признать, что хаотическое поведение решений нелинейной динамической системы – часто встречающийся в определенном диапазоне параметров системы вариант поведения решений нелинейной динамической системы. При других значениях параметров системы возникают разнообразные регулярные решения. И, наконец, на границе области значений параметров хаос-порядок обнаружены различные сценарии перехода от упорядоченного движения к хаосу и обратно [16]. Для некоторых нелинейных динамических систем небольшого порядка эти результаты математического моделирования на границе хаос-порядок получили подтверждение в численном эксперименте [17].

Математические модели управления крупномасштабными системами большей частью ориентированы на детерминированное поведение системы. В дополнение к таким подходам рассмотрим некоторые качественные нелинейные и хаотические эффекты, реализовавшиеся в крупномасштабных системах и не получившие пока соответствующего количественного отражения в моделях.

#### **3.1. Детерминированные и хаотические процессы в экономике**

В экономике полностью детерминированное состояние недостижимо. С точки зрения математической модели – такое состояние неустойчиво и не реализуется. Постоянно присутствует хаотическая составляющая. Доля ее может быть небольшой для плановых производственных процессов, например при конвейерной сборке машиностроительной продукции. Но эта небольшая хаотическая составляющая неустраима – случайные нарушения графика поставок комплектующих и тому подобные отклонения от регулярного процесса не могут быть полностью исключены в реальных условиях. Тем не менее многие производства работают «с колес», без локальных складов комплектующих. Оказалась экономически выгоднее принимать как данность и учитывать неизбежные отклонения от графика поставок, чем компенсировать нерегулярность поставок наличием локальных складов комплектующих. И во многих случаях реализовано комплексное решение – регулярная работа без складских запасов и организация локальных запасов комплектующих в случаях, когда убытки от случайной задержки поставки превышают определенный уровень.

Еще более очевидный пример не реализуемости полностью детерминированной работы экономической системы масштаба отрасли есть в гражданской авиации. В расписании и посадочных талонах указывается номер выхода на посадку в аэропорту, однако на практике достаточно часто этот выход оперативно изменяется по различным локальным причинам. К этому привыкли и пассажиры, и персонал. И в той же авиации формально указывается точное время вылета и прилета, и все участники

наблюдают заметные отклонения от обозначенных значений за счет местных условий для вылета и метеорологических отклонений для времени прилета.

В приведенных примерах хаотическая составляющая в динамике крупномасштабных систем является отрицательным фактором производственного процесса. Однако можно привести пример, когда хаотические проявления в крупномасштабной системе – экономике – являются источником прогресса. Из миллионов конкурирующих бизнес-инициатив небольшое количество оказываются эффективными, и из них формируются устойчивые формы бизнеса с большой долей регулярной составляющей и, естественно, какой-то непринципиальной для бизнеса долей хаотической составляющей. Один из многих примеров такой реализации зарождения устойчивых бизнес-решений в хаотической среде инициатив – рынок интернет-решений. Но большее количество бизнес-инициатив оказываются невыгодными в экономическом или нереализуемыми в техническом отношении. Это аналог неустойчивого решения нелинейной динамической системы.

В приведенных примерах новые устойчивые направления развития в крупномасштабных системах зарождаются за счет инициативы их авторов. Известны попытки плановой организации новых инновационных устойчивых бизнес-направлений. Во многих случаях инициатором и спонсором является государство.

Таким образом хаос в экономике проявляет качества спекулятивного риска. Он может иметь как отрицательные последствия (экономический ущерб), так и положительные исходы – зарождение новых устойчивых бизнес-направлений.

### 3.2. Управление детерминированными и хаотическими процессами в экономике и социуме

В социально-экономических системах также присутствует регулярная и хаотические компоненты поведения. Доли этих составляющих различны в разных областях социума. В военных подразделениях преобладает доля регулярной составляющей, в искусстве – хаотической.

Управление долей хаотической составляющей в крупномасштабной системе может реализовываться за счет внешних воздействий (аналог внешних сил в простейших моделях) и за счет факторов, снижающих реакцию системы на внешние воздействия (аналог диссипации в простейших моделях).

В экономике внешними воздействиями являются прямые финансовые вливания, информационное влияние (включая и дезинформацию), прямое регулирование, включающее административное давление и экономическую поддержку. За счет таких внешних воздействий доля хаотической составляющей в экономических системах снижается. Диссипативные явления в экономике, приводящие к снижению уровня хаотической составляющей, – налоги, административные ограничения, недобросовестная конкуренция.

Управление соотношением регулярной и хаотической составляющей в социуме также реализуется за счет внешних воздействий и диссипативных проявлений.

Можно выделить три формы внешних воздействий на социум. Во-первых, прямое экономическое влияние увеличивает устойчивость социума и снижает долю хаотической составляющей. Во-вторых, внешнее управляющее воздействие на социум может иметь форму информационного влияния. Причем это информационное влияние может как увеличивать хаотическую составляющую в динамике социума, так и способствовать стабилизации общества. В-третьих, административное влияние на поведения социума, как правило, направлено и часто приводит к уменьшению хаотических явлений в социуме.

Аналогом диссипации в социуме являются цензура и самоцензура, внешние и внутренние ограничения границ допустимого поведения индивидуумов и групп людей.

Выражение «анархия – мать порядка» появилось задолго до результатов нелинейной динамики и, по-видимому, соответствует впоследствии сформулированной возможности зарождения в среде хаоса упорядоченных решений.

Основной задачей управления крупномасштабными системами является установление рационального соотношения хаотических и детерминированных процессов. При снижении или устранении хаотических проявлений наступает застой, деградация, чрезмерная бюрократизация, детализация и регламентация процессов, которую на практике реализовать невозможно. При превалировании хаотических явлений сложно реализовать необходимый уровень управления крупномасштабной системой. Компромиссный уровень сочетания хаоса и порядка в крупномасштабной системе – цель управления.

#### 4. Самоорганизация как один из инструментов управления крупномасштабными системами

Самоорганизацию [18] в крупномасштабных системах можно рассматривать как одну из форм проявления синхронизации в более простых системах. Административное бюрократическое управление может быть дополнено процессами, основанными на самоорганизации.

Эффект самоорганизации присутствует в экономических и социальных системах разных масштабов. На уровне крупномасштабных систем возникающие и распадающиеся межгосударственные связи можно трактовать как самоорганизацию. На среднем уровне систем, например, предприятия, если срываются плановые поставки комплектующих – производитель самостоятельно ищет альтернативных поставщиков. Много лет существовавший серый импорт в условиях административных ограничений преобразовался в параллельный импорт и, соответственно, изменилась доля такого самоорганизовавшегося процесса.

Даже на микроуровне в группе из двух человек, объединенных или не объединенных экономическим интересом, возникает иерархия лидер – ведомый.

При построении алгоритмов управления крупномасштабными системами, к сожалению, редко осознанно применяется принцип «не мешай процессам самоорганизации в системе». Чаще система сама переходит в режим самоорганизации для компенсации дефектов бюрократической формы управления. При этом возможно появление новых процессов, которые по эффективности превосходят методы работы, регламентированные бюрократическими процедурами.

#### 5. Заключение

Математические модели для простых нелинейных динамических систем, позволяют качественно и количественно анализировать нелинейные эффекты и явления. Аналогичные эффекты для крупномасштабных систем при моделировании могут быть исследованы качественно. Поэтапное усложнение математических моделей динамики и управления крупномасштабными системами по аналогии с моделированием нелинейных динамических систем небольшой размерности позволит проводить количественный анализ нелинейных эффектов в системах большего масштаба.

Рациональное сочетание детерминированных и хаотических процессов, самоорганизации и жесткого управления в крупномасштабных системах – цель, к которой можно приблизиться при математическом моделировании управления крупномасштабными системами.

#### Литература

1. Цвиркун А.Д. Управление развитием крупномасштабных систем / А.Д.Цвиркун, С.Н.Васильев и др. - М.: Физматлит, 2012. - 496 с.
2. Форрестер Дж. Мировая динамика. – М.: АСТ, 2003. – 379 с.
3. Махов С.А. Математическое моделирование мировой динамики и устойчивого развития на примере модели Форрестера. – М.: Институт прикладной математики им. М.В.Келдыша РАН, 2005. – 26 с.
4. Петров Л.Ф. Методы динамического анализа экономики. – М.: Инфра-М, 2010. – 239 с.
5. Petrov L.F. Nonlinear effects in economic dynamic models // Nonlinear Analysis. – 2009. – Vol. 71. – P. 2366–2371.
6. Moon F. C., Holmes P. J. A magnetoelastic strange attractor // J. Sound Vib. – 1979. Vol. 65, N 2. – P. 285–296.
7. Занг В.-Б. Синергетическая экономика. Время и переменны в нелинейной экономической теории. – М.: Мир, 1999. - 335 с.
8. Петров Л.Ф. Нелинейная динамика механических систем: от асимптотических методов к детерминированному хаосу // Труды МФТИ. 2017. Том 9, № 3 (35). – С. 41-51.
9. Петерс Э. Хаос и порядок на рынках капитала. Новый аналитический взгляд на циклы, цены и изменчивость рынка. – М.: Мир, 2000. – 333 с.
10. Kiel L.D., Elliot E. Chaos Theory in the Social Sciences: Foundations and Applications. – Ann Arbor, 1996. - 348 p.
11. Акинфиев В.К., Цвиркун А.Д. Методы и инструментальные средства управления развитием компаний со сложной структурой активов. – М.: ИПУ РАН, 2020. – 307 с.
12. Полунин Ю.А., Тимофеев И.Н. Нелинейные политические процессы. – М.: МГИМО -Университет, 2009. – 204 с.
13. Бреер В.В. Управление толпой: Математические модели порогового коллективного поведения / Бреер В.В., Новиков Д.А., Рогаткин А.Д. - М.: URSS, 2022. – 166 с.
14. Блехман И.И. Синхронизация динамических систем. – М.: Наука, 1971. – 896 с.
15. Лоренц Э. Детерминированное непериодическое течение // Странные аттракторы. – М., 1981. – С. 88-116.
16. Feigenbaum M.J. Universal behavior in nonlinear systems // Los Alamos Sci. – 1980. Vol.1. – P. 4-27.
17. Картвелишвили В.М. Прикладные системно-динамические модели. Теория и практика / В.М. Картвелишвили, М.Е. Мазуров, Л.Ф. Петров. – М.: РЭУ им. Плеханова, 2018. – 240 с.
18. Милованов В.П. Синергетика и самоорганизация: Социально-экономические системы. – М.: URSS, 2015. – 224 с.