

## ДИНАМИЧЕСКИЕ ПРИНЦИПЫ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ И УПРАВЛЕНИЯ

Г.А. Леонов

Описаны подходы к прогнозированию и управлению, основанные на общих закономерностях проявления неустойчивостей в динамических системах. Эти подходы, развиваемые в рамках экспериментальной математики, предполагают отказ от попыток построения, идентификации и анализа приближенных моделей весьма сложных реальных динамических объектов. Вместо этого делаются попытки набрать некоторый экспериментальный материал на реальной модели и использовать его при получении прогноза и построении управления. Отмечено, что возникновение неустойчивостей характеризуется общими закономерностями, учет которых приводит к некоторым общим принципам качественной теории управления.

**Ключевые слова:** прогноз, управление, принцип Клаузевица, принцип «Master-slave».

### ВВЕДЕНИЕ

Для динамических систем, порожденных дифференциальными

$$\frac{dx}{dt} = f(x)$$

или разностными

$$x(t+1) - x(t) = f(x(t)), \quad x \in R^n,$$

уравнениями, имеет место следующее очевидное свойство решений

$$x(t+s, s, x_0) = x(t, 0, x_0) \quad (1)$$

для любой константы  $s > 0$ . Это свойство сохраняется и для более общих описаний динамических систем (в смысле их фазовых пространств или нелинейных операторов, действующих в этих пространствах).

Из равенства (1) следует, что участки траектории  $x(t, x_0)$ , начинающиеся в точке  $x_0$  в момент времени  $t=0$  и в момент времени  $t=\tau$ , совпадают.

Отсюда следует повторяемость физических экспериментов при одних и тех же условиях, и аналогичным образом — возможность прогнозирования процессов и управления ими.

Однако из-за проявления неустойчивостей, которые в последнее время интенсивно изучаются [1], отмеченное совпадение очень часто возможно

только на сравнительно небольших временных интервалах  $(0, \tau)$  и  $(s, s + \tau)$ .

В настоящей работе мы опишем некоторые подходы к прогнозированию и управлению, основанные на общих закономерностях проявления неустойчивостей в динамических системах. Эти подходы, развиваемые в рамках «экспериментальной математики», основаны на отказе от попыток построения, идентификации и анализа приближенных моделей весьма сложных реальных динамических объектов. Вместо этого делаются попытки набрать некоторый экспериментальный материал на реальной модели и использовать его при получении прогноза и построении управления. Кроме того, возникновение неустойчивостей характеризуется общими закономерностями, учет которых приводит к некоторым общим принципам качественной теории управления. Эти принципы также будут далее описаны.

### 1. ПОУЧИТЕЛЬНЫЙ ПРИМЕР. КАК МОЖНО ПРЕДСКАЗАТЬ ПОГОДУ НА НЕДЕЛЮ. ПОЧЕМУ ЕЕ НЕЛЬЗЯ ПРЕДСКАЗАТЬ БОЛЕЕ ЧЕМ НА ДВЕ НЕДЕЛИ

В 1950—1960 гг. прогресс в теории механики сплошных сред, с помощью которой создавались все более точные математические модели изменения атмосферы, в вычислительной математике, с помощью которой создавались все более эффективные алгоритмы решения дифференциальных

уравнений этих моделей, и в создании все более быстродействующих компьютеров, с помощью которых реализовывались эти алгоритмы, сформировал широко распространенное в те годы мнение, что нужно предпринять еще некоторые усилия в этих направлениях и прогноз погоды можно будет с уверенностью делать на многие недели, месяцы и даже годы.

Однако потом оказалось, что длительный прогноз невозможен.

Теоретически невозможность долговременного прогноза погоды была установлена в работах Э. Лоренца и его последователей [1], которые открыли неустойчивости в математических моделях атмосферы. Последнее означало сильную чувствительность решений дифференциальных уравнений, описывающих атмосферные процессы, к начальным условиям. Понимание возможности таких эффектов привело к наблюдательным экспериментам в рамках нового направления в «экспериментальной математике», которые мы здесь опишем.

В Европе накоплен большой материал метеорологических наблюдений. Такие наблюдения регулярно проводились в течение многих десятилетий.

Возьмем, например, наблюдения, которые были проведены 9 мая 2004 г. в выбранном нами регионе Европы. Подберем далее некоторый год (например, 18ху такой, что 9 мая этого 18ху года в этом же регионе наблюдались сходные метеорологические параметры (температура, давление, влажность, сила и направление ветра, облачность и др.). Эти параметры и есть начальные (и граничные) условия, по которым определяются решения дифференциальных уравнений модели атмосферы.

Уравнения адекватны законам механики сплошных сред. В разные годы эти законы не изменяются. Следовательно, и уравнения не изменяются. А решения однозначно определяются по уравнениям и начальным данным.

Начальные данные 9.05.2004 и 9.05.18ху одинаковы, уравнения одинаковы. Значит и решения, которые соответствуют изменению метеорологических данных (температуре, давлению, влажности и др.) также должны быть одинаковыми.

Следовательно, эти параметры, которые наблюдались в течение месяца (с 9.05 по 9.06 2004 и с 9.05 по 9.06.18ху), должны с хорошей точностью совпадать для каждого дня из выбранного временного промежутка. Например, метеоусловия 1.06.2004 и 1.06.18ху должны быть очень близки друг к другу.

Однако описанные нами эксперименты показывают, что такие совпадения имеют место на временных интервалах продолжительностью не более двух недель. В течение недели может быть хорошее совпадение и этим часто пользуются в метеорологии для краткосрочных прогнозов. Далее результа-

ты наблюдений резко расходятся. Поэтому метеоусловия на 1.06.2004 и 1.06.18ху, как правило, совершенно разные.

В чем же дело? Здесь оказывается, что небольшие расхождения в начальных данных в начальные моменты наблюдений приводят к большим расхождениям в наблюдаемых параметрах уже через две недели.

Таким образом, как бы точно мы ни описывали математическую модель атмосферы, какие бы совершенные методы вычислений к этим моделям мы ни применяли, какой бы быстродействующей техникой мы ни пользовались, результат будет один: больше, чем на две недели надежный прогноз погоды невозможен.

По этой причине японцы отказались делать прогнозы на срок более десяти суток.

Отметим здесь одно важное обстоятельство. Если в традиционном подходе основные проблемы состоят в построении все более точных математических моделей, разработке и реализации численных алгоритмов решения дифференциальных уравнений и идентификации параметров этих уравнений, то в описанном здесь подходе необходимо перейти к созданию специальных баз данных.

---

## 2. ПРЕДСКАЗАНИЕ ПОВЕДЕНИЯ РЫНКА КАК АНАЛОГ ПРЕДСКАЗАНИЯ ПОГОДЫ. КАКИЕ АНАЛОГИИ МОЖНО ПРОВЕСТИ МЕЖДУ ИЗМЕНЕНИЯМИ ПОГОДЫ И ИЗМЕНЕНИЯМИ РЫНКА?

---

Если физические законы и соответствующие им уравнения конвекции верны для любого временного интервала, то аналогичные законы рынка зависят от политики, финансового состояния и усмотрений участников рынка, которые неизменны лишь на коротком промежутке времени  $[t_0, T]$  (это дни или часы). Этим законам подчиняются изменения переменных величин рынка  $x_j(t)$ . Их (если проводить аналогию с предсказанием погоды) должно быть около десятка  $j = 1, \dots, 10$ .

Начальные (и граничные) условия в предсказании погоды здесь заменяются изменениями переменных на некотором «начальном» промежутке  $[t_0, t_1]$  ( $t_1$  значительно меньше  $T$ .) Здесь можно провести некоторую аналогию с «начальной функцией» для дифференциальных уравнений с запаздыванием.

**Гипотеза.** *Существуют классы рынков таких, что из «хорошего» совпадения всех наблюдаемых временных характеристик рынка  $x_j(t)$ ,  $j = 1, \dots, N$ , на промежутках  $[t_0, t_1]$  и  $[t_0 + \tau, t_1 + \tau]$ ,  $t_1 + \tau < T$ , следует их «хорошее» совпадение и на некоторых промежутках  $[t_0, t_1 + \varepsilon]$  и  $[t_0 + \tau, t_1 + \tau + \varepsilon]$ ,  $t_1 + \tau + \varepsilon < T$ . ♦*



«Хорошее» означает некоторое предварительное «сглаживание или усреднение» величин  $x_j(t)$ . Это аналогично тому, что мы учитываем, например, некоторое «среднее» значение скорости ветра, сглаживая на небольших временных интервалах его порывы или ослабления.

Таким образом, по-видимому, поведение некоторых рынков можно предсказывать на небольших временных интервалах так, как предсказывают сейчас погоду по схожим параметрам (характеристическим переменным) в предыдущих наблюдениях.

Безусловно, высказанная здесь гипотеза нуждается в проверке на конкретных многопараметрических рынках. Здесь важно удачно определять (также из экспериментов) масштабы времени (т. е. значения  $t_1$ ,  $T$ ,  $\tau$  и  $\varepsilon$ ).

### 3. ПРИНЦИП КЛАУЗЕВИЦА

Этот принцип изучают в любой академии Генерального штаба любой страны, которая заботится о своей безопасности. Для нас очень важно, что он допускает широкие обобщения и применим не только к вооруженной борьбе между государствами.

Сформулируем принцип Клаузевица для военных действий.

*Любая военная операция должна быть спланирована ограниченной в пространстве и во времени. Следующая операция планируется с учетом итогов предыдущей операции.*

Таким образом, любая война, какие бы цели она ни ставила, должна быть разбита на отдельные операции со своими тактическими целями, следующими одна за другой.

Цели операции, силы и средства, привлекаемые для ее выполнения, корректируются с учетом итогов предыдущих операций.

Выбор пространственных и временных ограничений операции составляет предмет военного искусства. Они выбираются из зачастую печального и кровавого предшествующего опыта.

Подчеркнем аналогию с невозможностью предсказать погоду более чем на две недели.

Здесь в сложной вооруженной борьбе также могут проявиться неустойчивости, и заранее утвержденные планы и шаблоны могут уже сами быть причиной краха операции.

Яркий пример применения принципа Клаузевица представляют собой знаменитые «10 Сталинских ударов» 1944 года. Предыдущий опыт войны привел Генеральный штаб Красной Армии к выводу, что оптимальный срок проведения операции 1—2 мес, ее пространственные рамки — 200—300 км. Для этих операций были созданы соответствующие организации — фронты (Ленинградский, Ка-

рельский, Белорусские, Украинские, Прибалтийские). Соединение военного опыта с точным следованием принципу Клаузевица приводило к следовавшим друг за другом успехам всех десяти операций: снятию блокады Ленинграда, освобождению Крыма, Юго-Западной Украины (Корсунь-Шевченковская операция), Белоруссии (операция «Багратион»), Молдавии (Яско-Кишиневская операция) и других регионов СССР.

Стремление после окончания спланированной операции «развить успех», т. е. по инерции продолжить движение, часто кончалось крахом.

Яркий пример этому — жестокое поражение Красной Армии в 1920 г. под Варшавой, крах немецкой армии под Сталинградом.

Поэтому кажущиеся непрофессионалу неестественными остановки немецкой армии под Дюнкерком в 1940 г. (в это время английская армия успела эвакуироваться через Ла-Манш) и Красной Армии под Варшавой в 1944 г. (в это время началось Варшавское восстание) были совершены в полном соответствии с принципом Клаузевица. В этих обоих случаях закончились предыдущие операции и нужно было спланировать и подготовить новые — взятие Дюнкерка и Варшавы.

Принцип Клаузевица необходимо учитывать при проведении любых глобальных реформ (в стране, в фирме, в государственной структуре). Необходимо четкое разделение планируемых преобразований на отдельные части, нужно последовательно проводить отдельные преобразования в жизнь, получить результаты и далее планировать с их учетом дальнейшие преобразования. Затем получить результаты второго этапа преобразований, учесть их при планировании третьего этапа реформ. И только после такого тщательного планирования запустить третий этап. И так далее.

Как разительно отличается управление процессом реформ, вытекающее из принципа Клаузевица, от непоследовательных действий руководства СССР и России в 1980—1990 гг.!

Безусловно, выбор глубины и времени каждого этапа реформ — это предмет административного и экономического искусства (также как аналогичные параметры для военной операции — предмет военного искусства). Конечно, необходимо, чтобы поставленные на каждом этапе цели были достижимы (т. е. чтобы инструментов и средств было достаточно для достижения поставленной цели).

И очень важно, соблюдая указанную выше последовательность действий, не упускать из виду поставленной конечной глобальной цели (также как при проведении военных операций глобальная цель — Победа).

#### 4. ПРИНЦИП КЛАУЗЕВИЦА В ЗАДАЧАХ С ОГРАНИЧЕННЫМИ РЕСУРСАМИ

Одна из модификаций принципа Клаузевица состоит в вычленении и последовательном решении приоритетных задач при ограниченных ресурсах. Напомним, что классический принцип Клаузевица — это расчленение основной задачи на последовательные решения специально выделенных подзадач.

Приведем одно из наиболее ярких применений модифицированного принципа Клаузевица.

В результате Первой мировой войны Германия потерпела жестокое поражение. Ее главный союзник — Австро-Венгрия — была расчленена и прекратила свое существование как мощное европейское государство. На Германию были наложены огромные контрибуции и жесткие ограничения на создание современной армии. В 1920-е гг. Германия была бедным и слабым государством. И вдруг, «почти мгновенно», в 1934—1936 гг. была создана мощная армия, оснащенная самым современным вооружением. В 1936 г. армия Германии превосходила по своей мощи армии Англии и Франции вместе взятых.

Каким образом это произошло?

После поражения в Первой мировой войне Германии удалось сохранить ядро Генерального штаба. Это были высокообразованные офицеры, имеющие боевой опыт и опыт организационной и мобилизационной работы. При их поддержке были сохранены старые и созданы новые конструкторские коллективы, разрабатывающие и создающие образцы новой военной техники, которые затем проходили испытания.

Однако запуска в серийное производство не было. Сразу же конструкторы на основе полученных результатов и рекомендаций Генерального штаба переходили к разработке следующего поколения вооружений.

Все это позволило незаметно для других стран создать лучшие образцы вооружений и практически одновременно в 1934 г. запустить их в серию, мобилизовать армию и снабдить ее этим вооружением в течение очень короткого срока. После этого спохватившиеся западные союзники пришли к выводу, что воевать с Германией в 1937 г. — безнадёжное мероприятие.

Приведенный здесь пример еще раз показывает необходимость применения динамических принципов управления.

#### 5. ПРИНЦИП «MASTER-SLAVE»

Принцип «Master-slave» широко распространен в современной технике. Он означает, что множество однотипных устройств (рабов — *slaves*), не свя-

занных друг с другом, одновременно работают, подчиняясь сигналам только одного эталонного устройства (хозяина, мастера — *master*).

Например, включая свой телевизор, вы одновременно включаете «сидящего» в вашем телевизоре «раба» — генератор строчной развертки, который управляет движением луча в электронно-лучевой трубке. На телевизионной станции есть хозяин — эталонный высокостабильный генератор, который посылает в телевизионном сигнале информацию о своей частоте. Эту информацию принимает ваш телевизионный приемник и специальное устройство — блок синхронизации — подстраивает генератора-раба к частоте генератора-хозяина. Раб не так высокостабилен, как хозяин, и все время необходимо следить за тем, чтобы он не «увел» свою частоту в какую-либо сторону. Такое слежение предполагает наличие обратной связи: как только раб начнет «уходить», так блок синхронизации сравнит частоты хозяина и раба и «заставит» раба снова работать на частоте хозяина.

Таким образом, принцип «master-slave» предполагает наличие мониторинга и обратной связи для каждого раба с тем, чтобы раб выполнял свою рабочую функцию.

Примером динамического планирования и управления по принципу master-slave служит конвейер. Master — это высокостабильная скорость конвейера, slaves — это рабочие, выполняющие независимо друг от друга однотипные операции со скоростью, которую «навязал» master — хозяин. Невыполнение с нужной скоростью необходимых операций сразу будет обнаружено (мониторинг) и предприняты меры к устранению такого невыполнения (обратная связь).

Другим ярким примером принципа «master-slave» служит команда пиратского парусного корабля. Без жестко синхронизированного выполнения команд капитана невозможно управление парусным кораблем. Поэтому абсолютно свободные люди — морские разбойники — добровольно организуются в систему «master-slaves» (хозяин-рабы), где они временно лишены какой-либо свободы.

Обычно этот жесткий принцип управления в коллективах людей стараются смягчить некоторыми иллюзиями «социального партнерства» и «корпоративности». Но, в сущности, хозяин остается хозяином, а раб — рабом.

#### 6. ПРИНЦИП ШИРОКИХ ПОЛНОМОЧИЙ (ПРИНЦИП ФЕДЕРАЛИЗМА)

Принцип широких полномочий (принцип федерализма) в определенной степени противоположен принципу «master-slave».

Конечно, не ко всем случаям подходит такое жесткое и одноканальное управление, как master-



slave. Часто наиболее приспособленной к выполнению поставленных требований оказывается иерархическая федеративная система управления.

Здесь также имеется один мастер (например, президент), но есть и подмастерья (например, губернаторы), которым передается часть полномочий мастера. Эти полномочия должны быть весьма широкими. Иначе система будет близка к работе по принципу master-slave. Однако здесь работа происходит на границах областей устойчивости. Поэтому в структуре системы необходимо предусмотреть серию специальных административных противоаварийных мер.

Прежде всего, в системе должен быть предусмотрен (и практически на автоматическом уровне применяться) механизм быстрой и решительной смены подмастерья, если он не удовлетворяет возложенным на него обязанностям и предъявляемым к нему требованиям.

Далее, должна быть предусмотрена система подготовки, подбора и воспитания подмастерьев, которая также выступала бы стабилизирующим фактором.

Ясно, что при хорошо отлаженной и правильно функционирующей федеративной системе все игроки подчиняются целой системе писаных и неписаных правил. Возникает традиция и система ценностей, на которую ориентируются все участники процесса.

Из изложенного следует, что частая и регулярная сменяемость и мастера, и подмастерьев не является стабилизирующим фактором. Скорее, наоборот. В каждой такой смене кроются элементы дестабилизации. И чем сложнее управляемая динамическая система, тем в большей степени они могут проявиться.

## 7. ПРИНЦИП НЕПРЕРЫВНОГО УСПЕШНОГО ПРОЦЕССА

Принцип непрерывного успешного процесса также является динамическим принципом управления, который стабилизирует систему, не дает возникнуть и развиваться неустойчивостям, которые могут привести к хаосу и разрушению системы «изнутри».

В математической теории динамических систем хорошо известно, что предвестниками развития неустойчивых процессов служат колебательные или «разнонаправленные» движения [1]. В динамической системе, где каждая ее подсистема эволюционирует с положительными производными, как правило, происходит подавление неустойчивостей.

Этот принцип давно применяется в кадровой политике крупных западных фирм. Он трансформируется здесь в следующее правило.

*Работника не рекомендуется понижать в должности, понижать его зарплату. Только движение вверх. Вплоть до последнего дня работы в фирме, когда ему объявляют об увольнении.*

Другими словами: лучше уволить, чем понизить.

В этом случае элементарная подсистема — конкретный работник — непрерывно двигается только вверх.

Хорошо известно, что резкое падение какого-либо показателя может привести к частичному или полному разрушению системы. Так началась Великая американская депрессия 1930-х гг.: на Нью-Йоркской фондовой бирже внезапно и резко упали курсы акций.

## 8. ЗАКОН ТЕРМИДОРА

*После каждой революции наступает диктатура.*

Этот закон явился обобщением многих исторических фактов в различных странах: в Англии, во Франции, в России и во многих других.

Как можно пояснить это явление в смысле возникновения и подавления неустойчивостей?

Во время революции оказываются снятыми многие ограничения — возникает много различных «степеней свободы» (в механике этот термин имеет точное значение). Социальная система становится более «многомерной». И такая многомерность может приводить (и, как правило, приводит) к неустойчивостям, которые в свою очередь влекут за собой хаотизацию общества. Общество срывается в хаос, который подавляется только одним (к сожалению!) способом — резким ограничением «степеней свободы». И система становится «маломерной» (а иногда и одномерной, одноканальной — вспомним принцип master-slave).

Такое ограничение свобод подавляет хаос: наступает диктатура, которая некоторое (иногда очень короткое) время приветствуется большинством общества.

## ЛИТЕРАТУРА

1. *Леонов Г.А.* Хаотическая динамика и классическая теория устойчивости движения. — М.: Регулярная и хаотическая динамика, 2006. — 160 с.

*Статья представлена к публикации членом редколлегии Д.А. Новиковым.*

**Леонов Геннадий Алексеевич** — д-р физ.-мат. наук, чл.-корр. РАН, декан, Санкт-Петербургский государственный университет, ☎ (812) 428-69-44, e-mail: leonov@math.spbu.ru