Как действительно устроены сложные информационно-управляющие системы?[1]

О. Н. Граничин, д. ф.-м. н.[2]
Санкт-Петербургский государственный университет,
Институт проблем машиноведения РАН
o.granichin@spbu.ru

Использование групповых сетевых методов и технологий определяют развитие теорий управления, коммуникаций и компьютеров в XXI веке. При решении сложных задач на практике все чаще применяют идеологию мультиагентных систем. В таких системах нет жестко заданных связей между элементами и каждый элемент - агент - обладает определенной самостоятельностью и в процессе решения задач способен образовывать связи с другими агентами по мере необходимости.

Новые возможности интеллектуального управления сложными мехатронными системами на переходных процессах и в условиях турбулентности открываются за счет миниатюризации и увеличения быстродействия вычислителей, датчиков и исполнительных устройств. Ранее вопросы адаптивного управления в изменчивой среде и с изменяющейся во времени структурой пространства состояний исследовались незначительно из-за ограниченных возможностей практической реализации. Изменение структуры пространства состояний (размерности) возможно в среде при кластеризации возмущающих факторов. В таких сложных системах адаптация к изменениям структуры внешних возмущений происходит за счет внутренней самоорганизации, как и в мультиагентных системах. В системе многих агентов при наличии согласованностей в поведении некоторых групп агентов общая размерность пространства состояний снижается. Действие возмущений может приводить и к нарушению согласованности поведения агентов в некоторой группе, это будет соответствовать повышению размерности пространства состояний.

Ключевые слова: кластеризация, самоорганизация, адаптивные системы, мультиагентные системы, пространство состояний переменной структуры, самолет с “перьями”.

Посвящается памяти Марио Ранедо-Сантьяго,

символизирующего “Ум, Честь и Совесть” 80-90х гг.

1. Введение

Со школьных и студенческих времен в памяти часто всплывают споры о познаваемости мира, о первичности бытия или сознания, об

[1]Работа выполнена при поддержке РНФ, проект №16-19-00057,(разделы 1–4), и РФФИ, проект №16-07-00890, (раздел 5).

[2]©О. Н. Граничин, 2016

объективных и субъективных идеалистах, экзистенциалистах, агностиках и т. п. Сейчас их оттесняют космологические теории, теории катастроф, о большом взрыве, множественности вселенных. Но до сих пор для большинства людей это “разговоры об абстрактных понятиях”, которые, как кажется, не имеют отношения к повседневной жизни. Не все понимают, что технологические успехи конца XX века и первого пятнадцатилетия XXI века заставляют смотреть на эти теории сквозь призму практических применений. Параллелизм описания явлений в микро и макро мирах отмечался давно. Планеты и звезды человечество наблюдает тысячелетиями, не будучи в состоянии что-то изменить в их поведении. Миниатюризация вычислительных устройств, датчиков, сенсоров и исполнительных механизмов актуализирует практическую востребованность адекватного описание явлений в микромире (правильнее с современных позиций говорить “наномире”).

Результаты первых испытаний атомной бомбы, изобретения лазера развеяли иллюзии “современной науки” о возможности предварительного четкого теоретического предсказания новых неизвестных ранее явлений, что усиливает у многих пессимизм в ожиданиях от результатов исследований ученых теоретиков. Как и в конце XIX века, сейчас наблюдается кризис современных теоретических представлений “о картине мира”. В начале прошлого столетия кризис не был преодолен, а только “отложен” еще на сто лет, за которые человечество испытало на себе чудовищные материалистические эксперименты. Сейчас нам необходимо новое понимание “картины мира”, пусть оно будет и более сложное, чем в “материализме и эмпириокритицизме”. Одна из современных иллюзий — конвергенция сознаний, общественных укладов, технологий. Это действительно актуально в период обострения антагонизмов, но не ведет нас вперед к пониманию процессов в окружающем мире, т. к. в результате применения формальных теорий дает в итоге хаос. В конце XX века В.Н. Жигулев [1] предложил добавить к трем принципам гегелевской логики (единства и борьбы противоположностей, отрицания отрицания, перехода количественных изменение в качественные) еще один — рождения противоположностей. На первый взгляд, казалось, что этот принцип — следствие третьего, и идеи В.Н. Жигулева не получили должного развития.

Как нам кажется, сейчас должны произойти изменения в по-

нимании устройства или описания мира, в котором найдется место и четвертому принципу диалектики, предложенному в книге В.Н. Жигулева.

Что является "узким местом" большинства современных теорий? Практически все приняли на вооружение аппарат и формализм динамических систем и стараются "выводить" свойства поведения окружающего мира из подобия поведению траекторий динамических систем в некотором пространстве состояний, забывая о том, что это всего лишь некоторая абстрактная математическая модель (которая действительно описывает многие явления в макромире с хорошей степенью аппроксимации). На наш взгляд, сейчас именно узкие рамки такого (кажущегося многим универсальным) формализма как раз и не дают возможностей для адекватного описания.

2. О математических моделях

Для "продвижения вперед" надо еще раз взглянуть на осознание понятия модели процесса. Монография О.Н.Граничина и Б.Т. Поляка [2] начинается с фразы:

"Точное решение любой проблемы возможно при точной постановке задачи, но связи и отношения в реально существующем мире настолько сложны и многообразны, что практически невозможно математически строго описать многие явления. Типичным подходом в теории является выбор близкой к реальным процессам математической модели и включение в нее различных помех, относящихся, с одной стороны, к грубости математической модели и, с другой стороны, характеризующих неконтролируемые внешние возмущения на объект или систему. Для всех математических моделей результатом эксперимента является математический объект — число, множество чисел, кривая и т. п. С математической точки зрения значительный круг прикладных задач имеет своей целью восстановление по экспериментальным данным характеристик (параметров) объекта. При этом реальные системы редко исчерпывающе описываются ограниченными математическими моделями. Выбирая модель для решения реальной задачи, принято говорить о так называемой систематической погрешности (погрешности модели), которая может быть количественно выражена расстоянием

от реального оператора до выбранной модели. Другой тип погрешностей (ошибок), с которыми может столкнуться экспериментатор, связан с ошибками измерения. Такие ошибки называют статистической погрешностью (случайной погрешностью). Процесс выбора характеристик (параметров) модели из заданного класса для наилучшего описания результатов представляет собой одно из достаточно общих определений понятия оценивания. На практике процесс оценивания часто удается связать с какой-нибудь количественной характеристикой качества оценивания и, естественно, при выборе оценок стараться минимизировать отрицательное влияние погрешностей как статистической, так, по возможности, и систематической".

Что за пятнадцать лет поменялось, какие новые аспекты надо отразить? Практически никто в научной литературе не воспринял всерьез "призыв" стараться учитывать сам факт возможности систематических ошибок. До сих пор среди исследователей превалирует убеждение о возможности "чистого" эксперимента, о том, что наличие систематических погрешностей — это недостаток разработчика модели. Но детальный анализ разных сложных динамически меняющихся процессов показывает более глубокие трудности [3]. Среди таких примеров:

- формирование многомасштабных вихревых структур в турбулентных потоках жидкостей и при пластическом течении твердых тел при импульсном нагружении;
- кластеризация в потоке концентрированных дисперсионных смесей;
- распространение фронта ударной волны внутри вещества;
- переходные слои вблизи межфазных границ;
- процессы образования белка в клетках;
- иерархия структур в живых системах;
- процессы расщепления ядер тяжелых элементов;
- термоядерный синтез;
- а также поведение групп людей.

Понятие *модели* тесно связано с другим чрезвычайно актуальным в современном мире понятием *информации*. При всем разнообразии возможных определений в контексте тематики этой статьи под информацией принято подразумевать *осознание субъектом изменений в изменяющемся мире* (см. обсуждение в книге О.Н. Граничина и В.И. Киява [4]. Очень важная черта — двойственность в понятии информация - и "осознание субъектом", и "произошедшее изменение".

Как субъект осознает изменение? Интуитивно (внутри себя) субъект "примеряет" к своим наблюдениям некоторую модель. Здесь очень важно подчеркнуть, что модель, таким образом, естественно связывается с субъектом. Процесс "осознания", как правило, не бывает мгновенным. С математической точки зрения ему наиболее соответствует "интегрирование" по какой-то пространственной или временной области. Для связи с дальнейшим текстом здесь важно подчеркнуть глубинную связь понятия информации о каком-то явлении (изменении) и процесса взаимодействия субъекта и явления.

3. Кластерные потоки

Как может быть устроена сложная система?

Будем считать, что введено однонаправленное время t, и будем рассматривать неизолированные системы состоящие из элементов, эволюция каждого из которых со временем определяется текущими состояниями как его самого, так и других элементов системы, а также внешними по отношению к системе возмущающими воздействиями W (отсутствие воздействия можно трактовать как нулевое воздействие). Конечно, можно внешние воздействия W формально включить в общий набор состояний системы. Однако в контексте построения информационных моделей, как уже отмечалось выше, в рассмотрение надо обязательно добавлять "субъекта", осознающего информацию, которого удобно выделять из системы и считать внешним. Кроме того, "включение" W с состав системы может существенно усложнить модель описания. Внешние воздействия W естественным образом делятся на две группы: $W = \begin{pmatrix} u \\ w \end{pmatrix}$, контролируемые u (иногда целесообразно использовать термин управляющие) и неконтролируемые w.

Обычно предполагают, что в момент времени t вектор состояний системы $x(t)$ конечномерный, и для описания динамики системы используют систему дифференциальных уравнений

$$\dot{x}_i = g_i(x, W),\ i = 1, 2, \ldots, n,\ x \in \mathbb{R}^n, \tag{1}$$

с некоторыми функциями $g_i(\cdot)$ и внешними возмущениями W. В такого типа моделях сложных систем, состоящих из огромного количества компонент, принято предполагать большую размерность n пространства состояний. Но, с одной стороны, выбор конечного числа n существенно ограничивает "потолок" сложности, а, с другой стороны, не позволяет легко учитывать возможную "гибкость" системы при изменении ее состава.

Будем считать, что система состоит из континуума элементов $X = \{x_\gamma\}$, параметризованных с помощью $\gamma \in [0, 1]$, и эволюция каждого из элементов описывается уравнением

$$\dot{x}_\gamma = g_\gamma(X, W). \tag{2}$$

Дополнительно предположим, что внешнее воздействие W при всей своей произвольности в каждый момент времени предполагается структурированным s и порядок структуры конечный, конечность структуры внешнего воздействия после некоторого переходного процесса вызывает в рассматриваемой сложной системе дискретизацию пространственных элементов (кластеризацию)

$$\mathcal{X}_s = \{X_1, X_2, \ldots, X_{n_s}\} :\ X = \cup_{i=1,2,\ldots,n_s} X_i,\ X_i \subset X. \tag{3}$$

Дискретизация происходит за счет самоорганизации групп элементов и их синхронизации. Для каждого кластера i естественным образом вводится набор из $m_i, m_i \in \mathbb{N}$, усредненных (по кластеру X_i) переменных $\bar{x}_i$ — набор некоторых интегралов по кластеру. Такой подход обычно используется для упрощения физических моделей (снижения размерности), когда в рассмотрение вводят общие интегральные характеристики кластеров элементов с похожими свойствами и рассматривают динамические модели в таких (сокращенных-уменьшенных) пространствах состояний. Эксперименты показывают, что такие упрощения обоснованы и часто дают хорошие результаты.

Обычно процесс "кластеризации" (саморганизации) в системе не однократный, а постоянно "перевоспроизводится" из-за изменений

внешних воздействий и критических изменений внутренних состояний. Но при этом будем считать, изменение структуры внешних воздействий происходит не постоянно, а в некоторые дискретные моменты времени $T_0, T_1, T_2, \ldots$. Это приводит к необходимости рассмотрения динамических процессов в условиях изменения структуры пространства состояний со временем.

Итак, при изменении структуры внешнего воздействия может измениться дискретизация пространственных элементов. Предположим, что этот переходной процесс занимает промежуток времени длительностью не более чем некоторое $\delta \geq 0$ (см. Рис. 1).

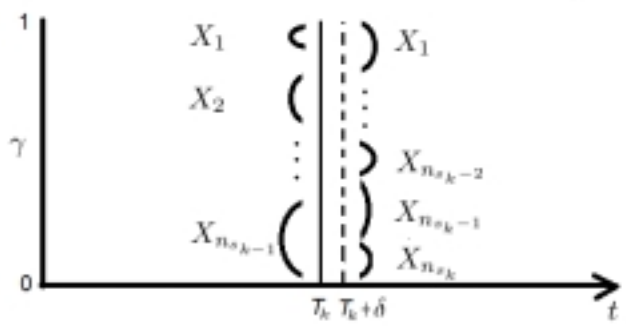

Рис. 1: Изменение структуры пространства состояний на интервале времени $[T_k, T_k + \delta]$.

Будем считать, что δ во много раз меньше интервалов между последовательными изменениями структуры внешних воздействий:

$$\delta << \zeta = \min_k |T_{k+1} - T_k|.$$

В дополнение к дискретизации пространственных переменных получаем дискретизацию по времени, пренебрегая длительностями интервалов переходных процессов. После такой дискретизации во многих практических приложениях на интервале времени от T_k до T_{k+1} система дифференциальных уравнений

$$\dot{\bar{x}}_i = \bar{g}_i(\bar{x}_1, \bar{x}_2, \ldots, \bar{x}_{n_{s_k}}, u, w, \theta_{s_k}),\ i = 1, 2, \ldots, n_{s_k}, \qquad (4)$$

в которой θ_{s_k} — некоторый конечномерный набор параметров, достаточно хорошо описывает динамику изменений в исходной сложной системе. Для близкого типа систем (но других) С.Ю. Пилюгин предложил использовать термин "кластерный поток", который, на наш взгляд, хорошо подчеркивает специфику динамических систем типа (4).

Конечномерная система (4) имеет вид (1) и хорошо изучена в теории дифференциальных уравнений, когда изучается динамика изолированной системы (случай $W = 0$). Этот частный случай вполне "укладывается" в рассматриваемую нами общую схему. Трудности при практическом использовании как раз и возникают при взаимодействии таких систем с окружающим миром. Введенная новая модель методически позволяет преодолеть трудные моменты в описании изменения структуры траекторий динамических систем. В классических нелинейных дифференциальных уравнениях рассматриваются точки "бифуркации" или "склеивания" траекторий. Новая модель, вероятно, дает гораздо более "богатую" основу для описания сложных явлений и процессов.

Примеры классических моделей:

- Падение тела под действием силы тяжести — все части (элементы) тела можно считать объединенными в один кластер.
- Закон всемирного тяготения Ньютона — динамика двух кластеров описывает притяжение двух тел.
- Движение планет в солнечной системе — законы Кеплера — кластеры — это планеты и солнце.

Другие примеры кластеров: частицы: электроны, протоны, нейтроны и др.; ядра; атомы; химические элементы; молекулы. Более ста лет одной из методически трудных проблем является дуальность в описании моделей наномира (микромира на уровне частиц, атомов молекул), выражающаяся в волновой и карпускулярных теориях. Если считать, как ранее до конца XIX века, все элементы материи частицами не получается написать адекватные наблюдениям динамические уравнения, но полностью волновые теории также не позволяют описывать все явления. Волновая функция

— объект бесконечномерный (континуальный). Проявления элементами наномира свойств тел (частиц) позволяют сводить их описания к конечномерным моделям. Проявление свойства частицы обеспечивается за счет возникающей в природе когерентности состояний (самоорганизации, кластеризации). Внешние воздействия или внутренние разбалансировки приводят к нарушениям когерентности (кластеризации), в силу волновых свойств новый переходный процесс приводит систему в новое когерентное состояние, которое часто нельзя "механически" вывести из "предыдущих" уравнений динамики предшествующих кластеров. Образуются новые карпускулярные свойства, которые опять описываются конечномерными динамическими уравнениями. Но пространство состояний этой модели — другое.

4. Самолет с "перьями"

Для описания движения твердого тела в пространстве все его составные элементы можно считать принадлежащими одному кластеру и рассматривать динамику изменений соответствующего вектора пространства состояний $\bar{x}_1(t)$, представляющего такие общие черты всей группы (интегральные характеристики), как положение центра масс в пространстве, скорость и вращение.

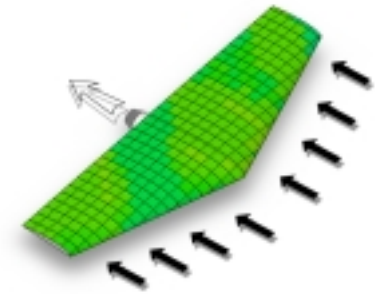

Рис. 2: Самолет в ламинарном потоке ветра.

Рассмотрим интересный пример — самолет с "перьями", у которого на поверхности закреплено большое количество подвижных

элементов. В ламинарном потоке ветра (см. Рис. 2), когда все конструктивные элементы (все "перья") испытывают одинаковое давление ветра (сила давления соответствует общему для всех зеленому цвету), динамика самолета описывается уравнением

$$\dot{\bar{x}_1} = \bar{g}_1(\bar{x}_1, u, w, \theta_{s_k}), \tag{5}$$

в котором $\bar{x}_1(t) \in \mathbb{R}^9$ — вектор текущего состояния (положение, скорость, вращение), u сила тяги двигателя, w — сила ветра, θ_{s_k} — параметры модели, определяемые структурой воздействия на самолет (угол приложения силы тяги двигателя, направление и плотность ветра). Если самолет движется равномерно и прямолинейно вдоль своей оси, по той же линии прилагается сила тяги двигателя и по ней же направлен равномерный поток ветра, то в [5] показано, что уравнения (5) линеаризуются.

В турбулентном потоке без адаптации (подстройки) "перьев" на разные элементы планера действуют разные силы давления (см. разноцветные элементы на Рис. 3 слева).

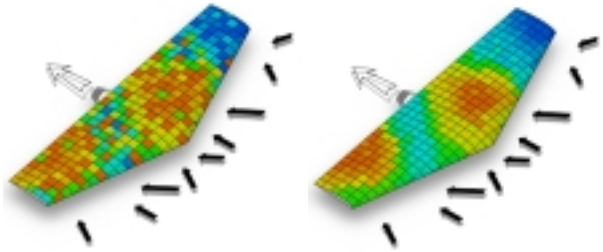

Рис. 3: Самолет в турбулентном потоке ветра. Кластеризация "перьев".

В неравновесных физических процессах во многих примерах самоорганизация элементов приводит к их упорядочиванию [6], часто возникает "внутреннее" управление, стремящееся компенсировать "дисбаланс" [7].

В [5] обосновывается гипотеза о том, что если подстраивать угол наклона перьев на основании разниц давлений с соседними элементами (перьями) по протоколу локального голосования (см. [8]), то в системе происходит кластеризация элементов (перьев). Типичный пример показан на Рис. 3 справа. Как видно, элементы группируются в шесть кластеров. В этом случае для описания динамики

полета самолета не достаточно рассматривать только одно уравнение (5). Кластеры с разным давлением на поверхность крыла создают дополнительные вращательные моменты, которыми нельзя пренебрегать. Если связи между элементами (перьями) позволяют "добраться" от любого элемента до любого другого (соответствующий граф связей имеет остовное дерево), то, используя тот же протокол локального голосования, получаем "выравнивание" давлений по всей поверхности планера (см. Рис. 4). Учитывая типичную задержку по времени реагирования элементов на изменения давлений у соседей и алгебраическую связность графа, в [5] получена оценка на время переходного процесса δ, за которое все элементы синхронизируются. После синхронизации элементов для описания динамики полета самолета опять применимо уравнение (5), но уже с другими параметрами θ_{s_k}.

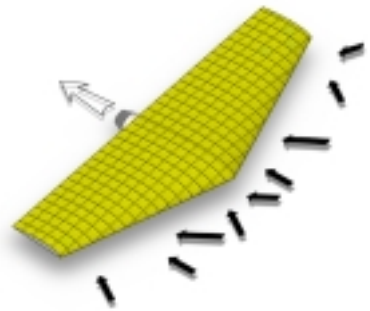

Рис. 4: "Выравнивание" давлений в турбулентном потоке ветра.

5. Цель управления, наблюдения, обратные связи, оценивание параметров

Вернемся к обсуждению понятия *информация*. Осознание субъектом произошедшего изменения, как правило, не остается без последствий. Полученная информация через некоторый механизм принятия решений "подталкивает" субъекта к действиям. Реализация принятого решения естественно влияет на информацию, способствуя новым изменениям объекта информации, т. е. сформирован-

ное действие (управление) u поступает в систему и воздействует на состояние X, во многих случаях изменяя его. Правильнее говорить о понятии *информационно-управленческой связи*, и не всегда в этой связи восприятие информации является первичным процессом. Во многих случаях конкретные действия субъекта "приводят" к получению новой информации. Детально связь понятий информация и управление анализируется в первой главе книги [9]. В определенном контексте можно считать, что информация и управление — два лица двуликого Януса — разные отражения одной той же некоторой сути. Но далее в тексте статьи эти понятия будем четко разделять: информация будет связана с системой (объектом информации), а управление — с внешним воздействием на систему.

Формализация процесса принятия управляющего решения обычно связывается с заданием цели управления, в определении которой участвуют реализовавшиеся траектория системы и совокупность управляющих воздействий. Если "отделить" процесс принятия решения от самой системы и "связать" его с некоторым субъектом, то для такого субъекта система представляется, прежде всего, как нечто целостное, а не совокупность разрозненных элементов (в противном случае можно рассматривать субъекта управления относительно более мелких систем). Будем считать, что цель управления на интервале времени $t \in [0, T)$ задается интегральным функционалом

$$\Phi(x(\cdot), u(\cdot)) = \int_0^T Q(x, u)dt \tag{6}$$

от заданной функции качества $Q(x, u)$, зависящей от некоторой конечномерной интегральной характеристики $x(t)$ реализовавшейся траектории $X(t)$ системы (2), а также от конечномерного управления $u(t)$. Цель управления может заключаться или в оптимизации функционала (6) или в обеспечении его ограничений в заданных границах. Типичные примеры функций $Q(x, u)$ следующие:

$$Q(x, u) = |x(t) - x_\star(t)|,\ Q(x, u) = |x(t) - x_\star(t)| + |u(t)|,$$

$$Q(x, u) = \begin{pmatrix} x(t) - x_\star(t) \\ u(t) \end{pmatrix}^{\mathrm{T}} R \begin{pmatrix} x(t) - x_\star(t) \\ u(t) \end{pmatrix},$$

где $x_\star(\cdot)$ — некоторая заданная (желаемая) траектория, или $Q(x, u)$ — дельта-функция, выделяющая значение $x(t_\star - x_\star(t_\star)$ в некоторый момент времени $t_\star$.

Для помощи при формализации связи информации и процесса принятия решения в автоматических устройствах удобно использовать схему Рис. 5 при предположениях, что информация о явлении x (некоторая интегральная характеристика от X важная для исследователя) проявляет себя через некоторые формы коммуникации Ψ в виде некоторого сигнала f, который может записан специальными регистраторами или сенсорами. Процесс наблюдения обычно достаточно сложный и может трактоваться как применение некоторого оператора A к сигналу f. Полученные данные y могут использоваться для восстановления (оценивания) информации x. Оценку $\hat{x}$ можно сгенерировать по данным y на основании некоторых знаний. В результате оценивания как раз и выявляются изменения в исследуемом явлении, которые ведут к принятию того или иного управляющего решения.

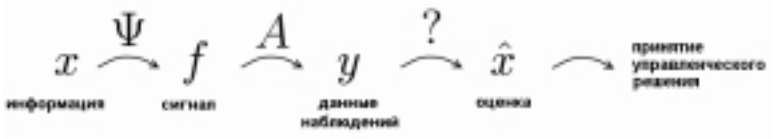

Рис. 5: Схема процесса обработки информации.

Необходимые знания для оценивания может дать адекватная модель явления. Важно отметить, что описанная в разделе 3 модель кластерных потоков (4) вполне адекватна введенному понятию о цели управления и только что описанной схеме процесса обработки информации из-за сделанного предположения об "интегральной" природе изучаемой информации о явлении x. В модели (4) компоненты вектора состояний — некоторые интегральные характеристики образовавшихся на интервале времени $(T_k, T_{k+1}]$ кластеров. В силу аддитивности интегрирования, не умаляя общности можно считать, что некоторые части компонент наборов $\bar{x}_i$ являются частями x, т. е. на интервале времени $(T_k, T_{k+1}]$ информация x полностью определяется "текущим" конечномерным набором обобщенных состояний $\bar{x}_1, \bar{x}_2, \ldots, \bar{x}_{n_{s_k}}$. Конечно, после изменения структуры на следующем интервале $(T_{k+1}, T_{k+2}]$ информация также будет полностью определяться "текущим" конечномерным набором обобщенных состояний, но зависимость может оказаться уже совершенно иной. То же самое можно сказать и получаемых дан-

ных наблюдения y. Правда, еще одним существенным осложнением на практике является то, что обычно процесс регистрации данных не бывает мгновенным, а представляет собой усреднение некоторой функции $f(\cdot)$ по временному отрезку регистрации Δ:

$$Y(t) = \int_{t-\Delta}^{t} f(x,u,w)dt' = \int_{t-\Delta}^{t} \bar{f}_k(\bar{x}_1, \bar{x}_2, \ldots, \bar{x}_{n_{s_k}}, u, w, \theta_{s_k})dt'. \tag{7}$$

После дискретизации для $y_i = Y(t_i)$, $t_i \in [T_k, T_{k+1}]$, используя некоторые упрощающие предположения о модели наблюдений, можно получить:

$$y_i = \tilde{f}_k(x_i, u_i, w_i, \theta(s_k)) + \xi_i, \tag{8}$$

где $\tilde{f}_k(\cdot)$ — некоторые функции от

$$x_i = col(\bar{x}_1(t_i), \bar{x}_2(t_i), \ldots, \bar{x}_{n_{s_k}}(t_i)),\ u_i = u(t_i),\ w_i = w(t_i),\ \theta_{s_k},$$

а $\xi_i = \xi_i' + \xi_i(s_k)''$ представляет собой сумму стандартной ошибки наблюдения ξ_i', которая обычно случайной природы, и систематической ошибки $\xi_i(s_k)''$ (ошибки модели). Неконтролируемым возмущениям w_i также часто обоснованно приписывают стандартные статистические свойства. В этом случае статистическую ошибку ξ_i' можно включить в (8) как дополнительную компоненту w_i, тогда ξ_i будет представлять только систематическую ошибку $\xi_i(s_m)''$, которая зависит от текущей структуры. К сожалению, в противоположность статистическим ошибкам ξ_i' про систематические ошибки ξ_i'' обычно можно только предположить их ограниченность, а в остальном они могут быть произвольными.

После выбора структуры математической модели остается существенная проблема определения актуальных значений параметров системы $\theta(s_k)$ на базе зарегистрированных наблюдений (задача идентификации системы). На основании уточнения закона движения далее можно переходить к формированию управлений, обеспечивающих задаваемую цель управления. Миниатюризация и рост возможностей сенсоров позволяют предположить, что $\Delta << \zeta$, т. е. до момента следующего существенного изменения структуры можно получить достаточно много наблюдений. В литературе предлагается много способов оценивания неизвестных параметров системы

по наблюдениям с помехами (см., например, [10]). Например, если помехи предполагаются случайными и центрированными, то алгоритмы основанные на простом усреднении данных наблюдений широко используются в инженерной практике. Однако, если статистические предположения о помехах были сделаны без существенных обоснований, то такие алгоритмы дают ошибочные оценки. Альтернативный подход, основанный на построении гарантированных множеств для оценок при предположениях об ограниченности помех (см., например, [11]), дает только консервативные оценки границ возможных областей параметров.

В условиях изменений структуры пространства состояний актуализируется необходимость разработки методов адаптивного управления на основе конечного (возможно малого) набора экспериментальных данных в противоположность традиционным асимптотическим методам. В ряде случаев рандомизация процессов наблюдений или внешних воздействий на систему позволяет "навязать" системе задаваемые рандомизацией (известные) статистические свойства, что во многих ситуациях помогает более аккуратно оценивать текущие параметры системы и формировать управляющие воздействия. В условиях оценивания по конечному числу наблюдений такой новый подход, использующий пробное рандомизированное возмущение, подаваемое в систему через канал управления вместе с "собственно управлением", формируемым по адаптивной обратной связи, предложен и обоснован в [12]. Идентификация (оценивание) неизвестных параметров при произвольных внешних помехах обеспечивается схемой исключения областей знако-доминирующих корреляций, предложенной ранее Марко Кампи с соавторами [13, 14].

6. Заключение

Надеюсь, что описанный в статье новый тип моделей — кластерные потоки — привлечет внимание исследователей и в будущем о них будут писать в таких высокорейтинговых журналах, как *Nuture* или *Science*.

Список литературы

[1] Жигулев В.Н. Динамика неустойчивостей. М.: МУГИ. 1991. 152 с.

[2] *Граничин О.Н., Поляк Б.Т.* Рандомизированные алгоритмы оценивания и оптимизации при почти произвольных помехах. М.: Наука. 2003. 293 с.

[3] *Граничин О.Н., Хантулева Т.А.* Гибридные системы и рандомизированные измерения в неравновесных процессах // Дифференциальные уравнения и процессы управления. №3. 2004. С. 35–43.

[4] *Граничин О.Н., Кияв В.И.* Информационные технологии и системы в современном менеджменте. СПб: ВВМ. 2014. 897 с.

[5] *Amelin K., Amelina N., Granichin O., Khantuleva T.* Adaptations of airplane's "feathers" in a turbulence flow // Proc. CDC2016 (submitted).

[6] *Nicolis G., Prigogine I.* Self-Organization in Nonequilibrium Systems. From Dissipative Structure to Order Through Fluctuations. N.Y.: Wiley. 1977.

[7] *Khantuleva T., Abdullaev K.* Internal control in nonequilibrium physical processes // Cybernetics and Physics. Vol. 3. No. 1. 2014. PP. 21–27.

[8] *Amelina N., Fradkov A., Jiang Y., Vergados D.* Approximate consensus in stochastic networks with application to load balancing // IEEE Transactions on Information Theory. Vol. 61. No. 4. 2015. PP. 1739–1752.

[9] *Granichin O., Volkovich Z. V., Toledano-Kitai D.* Randomized Algorithms in Automatic Control and Data Mining. Springer. 2015.

[10] *Ljung L.* System Identification: Theory for the User. Englewood Cliffs. NJ, Prentice Hall. 1999.

[11] *Поляк Б.Т., Хлебников М.В., Щербаков П.С.* Управление линейными системами при внешних возмущениях: Техника линейных матричных неравенств. М.:ЛЕВАНД. 2014.

[12] *Amelin K., Granichin O.* Randomized control strategies under arbitrary external noise // IEEE Transactions on Automatic Control. 2016. Vol. 61. No. 5. PP. 1328–1333.

[13] *Campi M. C., Sangho K., Weyer E.* Non-asymptotic confidence regions for model parameters in the presence of unmodelled dynamics // Automatica. 2009. Vol. 45. No. 10. PP. 2175–2186.

[14] *Campi M. C., Weyer E.* Non-asymptotic confidence sets for the parameters of linear transfer functions // IEEE Transactions on Automatic Control. 2010. Vol. 55. No. 12. PP. 2708–2720.