

УДК 681.5.01

В.А. Терехов**УПРАВЛЕНИЕ В ДИНАМИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ: СОВРЕМЕННЫЕ
ЗАДАЧИ И ПОДХОДЫ**

На обсуждение выносятся оценка текущего состояния теории управления техническими объектами, вызовы, диктуемые нелинейной динамикой процессов управления, приоритетные задачи и подходы к их решению. Развитие теории управления обсуждается в контексте трех периодов её становления: периода классической механики Ньютона, современного периода и в направлении будущей роли теории управления как составляющей процесса создания самоуправляемых объектов и технологий. Свойства управляемых систем рассматриваются с точки зрения нелинейной динамики, адаптации, принципа необходимого разнообразия.

Нелинейная динамика; синергетика; адаптация; обобщенные модели; целевые многообразия; нейронные сети.

V.A. Terekhov**CONTROL IN DYNAMICAL SYSTEMS: MODERN CHALLENGES
AND APPROACHES**

We present and discuss a retrospective overview of the development of control theory for technical systems and technologies. We start our discussion with reviewing relevant ideas stemming from the era of classical Newtonian mechanics and then proceed to the analysis of their metamorphosis to the needs of the modern period. The discussion is followed by highlighting directions with possible substantial potential for future developments in which the control theory is considered as an inherent component in designing and creating new classes of self-controlled systems, plants and technologies. Control systems properties are considered in terms of nonlinear dynamics, adaptation and the law of requisite variety.

Nonlinear dynamics; synergetic; adaptation; generalized models; target manifolds of the system's motion; neural networks.

Введение. Для начала процитируем фрагмент статьи Ю.С. Ильяшенко [1]: "...исследование динамических систем можно условно разбить на три периода.

Период Ньютона: дано дифференциальное уравнение. Решить его.

Период Пуанкаре: дано дифференциальное уравнение. Описать свойства его решений, не решая уравнение, а лишь используя свойства правой части.

Период Андронова: Не дано никакого дифференциального уравнения. Описать свойства его решений".

Теория управления – это теория динамических систем, основным аппаратом анализа и синтеза которых были и остаются обыкновенные дифференциальные уравнения. Развитие теории управления и профильных специальностей, фундаментом которых она служит, рассмотрено далее с позиции приведенной "периодограммы", в соответствии которой можно поставить и периоды развития науки об управлении. Далее рассматриваются некоторые аспекты существующего положения вещей и первостепенные, на наш взгляд, этапы эволюции теории управления, имея в виду ее приложения к техническим системам.

Начало систематическим наукам об управлении положила знаменитая книга американского математика Н. Винера (1894–1964) "Кибернетика", вышедшая в свет в 1948 г. [2]. Однако напомним, что кибернетике Винера предшествовала кибернетика Андре-Мари Ампера (1775–1836), определившего в своем фундамен-

тальном труде "Опыт о философии наук" (1834) *кибернетику* (от греч. *kybernetike*) как науку об *управлении государством* [3]. Далее речь идет о кибернетике по Винеру, в основу которой положен как *всеобщий* принцип обратной связи в сложных системах – живых и искусственных, технических.

Примеры первых технических автоматических систем регулирования относятся ко второй четверти XVIII-го века, ко времени промышленных революций в технически развитых странах Европы, в том числе и в России [4]. Автоматическое регулирование как область техники появилось значительно позже, чем теплотехника, электротехника, машиноведение, энергетика, оборонная техника и т.д. Изначально роль и назначение автоматики определялись проблемами эксплуатации машин, производства, которые возникали в перечисленных отраслях. Назначение систем автоматического регулирования состояло, главным образом, в стабилизации режимов работы регулируемых объектов в соответствии с предписанным для них регламентом. Математическая теория автоматического регулирования в виде, инвариантном к конкретной области техники, начала формировать в конце 40-х – начале 50-х годов прошлого века. Как раз в это время и появилась знаменитая книга Н. Винера.

Классическая теория управления: "... дано дифференциальное уравнение. Решить его". Период или, как еще говорят, "программа" Ньютона (1643–1727), – без преувеличения! – оказала решающее влияние на развитие естествознания двух последних веков, тем самым и на ход цивилизации во всех ее проявлениях вплоть до настоящего времени. Классическая механика, основанная на использовании *линейных* дифференциальных уравнениях, обобщенная и формализованная У.Р. Гамильтоном (1806–1865), в такой же решающей степени оказала влияние и на становление *науки об управлении в технических системах*, подобно тому как линейные модели были основным объектом исследований в теоретической физике (квантовая механика, гидродинамика, электродинамика, оптика, физика плазмы и т.д. [5]) и сыграли ключевую роль в становлении современного естествознания. Такое влияние объясняется тем, что многие явления природы, техники с достаточной для целей практики степенью достоверности с физической точки зрения могут быть описаны линеаризованными моделями.

Классическая теория управления как наука о принципах и методах управления различными физическими системами, процессами и объектами технических систем базируется на научных принципах и теориях, сформированных в течение двух веков выдающимися учеными: J.V. Poncelet, братьями Siemens Werner & Wilhelm, J.C. Maxwell, E.J. Routh, H. Poincare, A. Stodola, A. Hurwitz, И.А. Вышнеградским, П.Л. Чебышевым, А.М. Ляпуновым в XIX-м веке; N. Wiener, L.A. Mac-Coll, H. Bode, W. Shannon, St. Beer, W.-R. Ashby, R. Bellman, R. Kalman, E.I. Jury, J.T. Tou, И.Е. Жуковским, Н.Г. Четаевым, И.Н. Вознесенским, А.А. Андроновым, Г.В. Шипановым, А. И. Лурье, Н.Н. Красовским, Л.С. Понтрягиным, А.М. Летовым, А.А. Фельдбаумом, Я.З. Цыпкиным, А.А. Красовским, В.А. Якубовичем в XX-м веке¹. Более полное определение теории управления, охватывающее множество ее приложений, существенно расширило бы перечень приведенных имен и привело бы к необходимости обратиться к принципам, высказанным еще задолго до нашей эры философами древней Греции и Китая [6].

Суть классической теории управления: на основе анализа исходных (начальных) знаний об объекте управления составляется его математическая модель, формулируются технологическая и математическая цели управления, после чего синтезируется необходимый (-е) алгоритм (-ы) управления и анализируются свойства по-

¹ Приведенные ссылки далеко не полно характеризуют историю становления и развития науки об управлении.

лученной математической модели автоматической системы. Этот процесс может иметь циклический характер.

В такой постановке детерминированная или стохастическая, параметрически определенная или, в каком-то смысле недоопределенная модель объекта формируется применительно к уже *существующему* устройству, технологическому процессу и т.д., разработанному, сконструированному и изготовленному до того времени, когда выявляется необходимость управления как неизбежного условия успешной эксплуатации такого объекта. Процесс создания будущего объекта управления и процесс синтеза с последующей реализацией системы автоматического управления объектом отделены друг от друга. Сам процесс "внедрения" автоматических систем управления сопровождался, как правило, процессом *упрощения* исходно нелинейных математических моделей управляемых объектов, главным признаком чего являлась устойчивая тенденция к их линеаризации. В этих случаях, заметим, наиболее распространенных до сего времени, роль управления сводится к "исправлению" пороков конструкции *не всегда* управляемого устройства или технологического процесса.

Науке об управлении, таким образом, отводится роль обслуживающей составляющей процесса создания технологий. Такая ее "дискриминация" складывалась на протяжении многих десятилетий XX-го века, предопределила и продолжает сказываться на направлениях подготовки специалистов по автоматике и управлению. Однако давно уже стало ясно, что в процессе создания современных технологий в любой области техники специалист по управлению должен быть соучастником этого процесса, ибо не существует *не управляемых* технологий!

Теории управления в технических системах этого периода посвящена обширная литература (см., например, в [7, 8]). Обстоятельный наукометрический анализ текущего состояния теории управления содержится в очерке акад. А.А. Красовского (1921–2003) [7, гл.1].

Современная теория управления. "... дано дифференциальное уравнение. Описать свойства его решений, не решая уравнение, а лишь используя свойства правой части" (Ю. С. Ильяшенко).

"... истинные законы не могут быть линейными" (А. Эйнштейн).

Первым, кто сделал переход от необходимости искать решения дифференциальных уравнений к анализу их правых частей с целью исследований качественных характеристик этих решений, был великий французский математик Анри Пуанкаре (1854–1912). Создатель геометрической теории дифференциальных уравнений стал предтечей современного подхода к решению задач анализа и синтеза управляемых нелинейных динамических систем.

Суть современной теории управления: на основе анализа правых частей обыкновенных нелинейных дифференциальных уравнений, знаний принципов действия и физических, химических и др. свойств объектов, эмпирических данных решается задача формулирования *физически адекватных и математически корректных моделей объектов*, целей функционирования управляемых динамических систем и синтез нелинейных законов управления [10, 11, 12].

Пересмотр роли науки об управлении в современном технологическом и информационном мире, где инновации чаще всего возникают на стыках различных традиционных наук, а не только в силу развития внутри самой "родной" области знаний, требует пересмотра стереотипа мышления "...на ту или иную проблему с застывших позиций или, говоря языком теории систем, в пребывании исследователя в неизменной системе координат. Наиболее радикальным ... является введение нового языка науки и построение на его основе обобщенных моделей, описывающих расширенную область поведения с *множеством* (*курсив* – наш) «позиций

наблюдения», с которых можно «рассматривать» изучаемую проблему" [11]. Подобный взгляд порожден новой парадигмой управления в мире *нелинейных* систем. Ее новизна порождена:

1) *во-первых*, качественно новыми режимами поведения нелинейных систем, существованием особых фазовых состояний ("детерминированный хаос") и фазовых переходов – бифуркаций, изменяющих структуру фазового пространства, не единственностью решения задач управления, не имеющими места в классической теории;

2) *во-вторых*, изменением целей управления в динамических системах. В классических постановках синтеза управляемых систем целевая динамика, как уже было сказано выше, ограничивается устойчивыми по Ляпунову движениями. Тем или иным способом традиционный подход к решению задач управления и регулирования предполагает стабилизацию структурно-устойчивых аттракторов в фазовом пространстве динамических систем. Например, в задаче управления экзотермической реакцией седловая точка, отвечающая желаемому состоянию, может быть силовым путем редуцирована в устойчивое положение равновесия. Но в реальных физических системах существуют такие особенности состояния, как *локальная неустойчивость, неравновесность, мета- или мультистабильность*, которые могут, а в ряде случаев должны быть целевыми. Поэтому в этих и подобных им "неклассических" задачах класс целевых движений должен быть расширен до более широкого спектра систем, обладающих общим для них физически обоснованным свойством: сигнал ограниченной энергии на входе порождает сигнал ограниченной амплитуды на выходе. Таким свойством обладает, например, ряд систем с хаотическими аттракторами;

3) *в-третьих*, наблюдаемой в последние годы тенденцией к преодолению "проклятья размерности", отходом от доминирования традиционных линейных подходов к решению задач управления в многомерных и многосвязных системах;

4) *в-четвертых*, необходимостью перехода к новым концепциям управления². Например, в упомянутой выше задаче "силового" управления течением экзотермической реакции, когда седловая особая точка трансформируется в устойчивый узел, целесообразнее применить альтернативный подход, в котором достижение цели управления осуществляется за счет использования динамических свойств самого объекта управления. Для этого седловые точки стабилизируются путем создания гомоклинических циклов с периодом колебаний, стремящихся к бесконечно большому значению. В конечном масштабе времени траектории на таком цикле "зависают" в малой окрестности седла. В линейном приближении тип особой точки не меняется, а, значит, в ее окрестности управляющее воздействие на систему будет *минимальным*.

Состояния динамических систем, не укладывающихся в линейную парадигму, следствия, порождаемые этими состояниями, причины их возникновения, природные и искусственные явления, иллюстрирующие необычные для классического мировоззрения формы поведения и не объяснимые с позиций научного классицизма, "неожиданные" актуальность и распространенность нелинейных явлений природы и техногенной среды породили в XX-м веке такие междисциплинарные науки, как *синергетика* и *нелинейная динамика* [5, 11].

Историческими примерами нелинейных явлений являются колебательные химические реакции *Белоусова–Жаботинского* [13, 14] и их модель – так называемый "*брюсселятор*" И. Пригожина; гипотетическая модель динамики химических реакций, протекающих в некоторой смеси с перемешиванием, в которых возможен "хи-

² Например, синергетическая "концепция управляемого взаимодействия, энергии, вещества и информации", высказанная в [11. С. 57].

мический хаос", – так называемая "модель О. Рёслера" [15]; модели хаотической динамики: в строительной механике – аттрактор *Дуффинга–Холмса* [16] с двумя потенциальными ямами; в электротехнике – аттрактор *Дуффинга–Уэды*; в гидромеханике – уравнения *Э. Лоренца* [17]. Собственно с последней модели детерминированного хаоса начался настоящий и всеобщий интерес к нелинейной науке.

Теория управления была подготовлена к восприятию новых задач, поскольку уже с середины XX-го века в теории автоматического управления существовал мощный раздел по теории нелинейных систем управления со своими научными подходами и методами (метод функций Ляпунова, теория автоколебательных систем, теория абсолютной устойчивости, теория аналитического конструирования оптимальных регуляторов Летова–Калмана и др. [18]). Понимание роли процессов управления в изучении сложных технических систем, современных технологий, в биофизике, нейротехнологиях и т. д. все более проявляется в тех областях естествознания, которые ранее были далеки от науки управления. Например, в последние годы громко заявила о себе *кибернетическая физика* [19, 20].

Проблемы управления нелинейными динамическими объектами. Ограничим круг упоминаемых далее управляемых систем такими, для которых доминирующими свойствами являются:

- ◆ *нелинейность динамики*;
- ◆ *адаптивность*;
- ◆ *выполнение принципа необходимого разнообразия У.-Р. Эшби (1903–1972) – первого фундаментального закона кибернетики, заключающегося в том, что разнообразие состояний сложной динамической системы требует управления, которое само обладает достаточным разнообразием, гарантирующим достижимость цели управления* [21].

Анализ "неклассических" задач управления в таких системах [22, 23, 24] приводит к появлению проблем, требующих своего разрешения или развития.

1. *Проблема формирования целей управления.* Общепринятая постановка задач управления, в том числе адаптивного, предполагает существование функции Ляпунова для системы с "идеальным" регулятором основного контура, что а priori сужает класс допустимых целевых движений в системе. Так, в частности, *неустойчивые и неравновесные режимы* не могут выступать в роли целевой динамики для стандартных методов адаптивного управления. С другой стороны, например, физические процессы в лазерах (*мультистабильность, нерегулярность*), в химических реакторах (уравнение реакции-диффузии) являются примерами систем, в которых такие режимы – естественное динамическое состояние. К классу задач, допускающих неустойчивые по Ляпунову режимы нормального функционирования, следует отнести и задачу *управления бифуркациями*, где целевыми движениями могут быть неустойчивые и хаотические колебания, задачи промежуточной (от англ. – *intermittent*) и перемежающейся, странствующей (от англ. – *itinerancy*) синхронизации в системах параллельной аналоговой обработки информации. Возникает необходимость в распространении методов адаптивного управления на системы с *неустойчивыми по Ляпунову целевыми режимами*.

2. *Проблема качества адаптивных систем.* Большинство алгоритмов адаптивного управления гарантируют устойчивость по Ляпунову адаптивной системы в расширенном пространстве состояний, включающем параметры и состояние наблюдателя. При этом игнорируется тот факт, что свойство устойчивости по Ляпунову гарантирует лишь малость отклонений от положения равновесия при условии малых возмущений. С другой стороны, адаптивные постановки задачи управления в условиях неопределенности оправданы лишь при относительно больших

по норме параметрических возмущениях (см. работу³, где это утверждение иллюстрируется на примере *метода обхода интегратора*).

3. Третий круг проблем порожден одной из основных проблем современной теории управления – проблемой получения *адекватных с физической точки зрения и математически корректных моделей динамических объектов* для синтеза заведомо грубых систем управления. Управление по выходу (адаптивное в том числе) использует математические модели физических объектов в классах дифференциальных уравнений. Это представляется естественным и очевидным. Первый шаг в сторону приближения линеаризованных моделей нелинейных по своей природе реальных объектов и систем состоит в использовании в задачах синтеза законов управления исходно нелинейных моделей в виде нелинейных дифференциальных уравнений. Однако и для нелинейных моделей в большинстве случаев информация о поведении системы традиционно формируется в виде измеряемых входов/выходов, т. е. используется первичная измерительная информация. Но фундаментальные свойства нелинейных систем определяются *инвариантами* ("параметрами порядка" в синергетике), образуемыми переменными состояния или совокупностью измеряемых переменных. В частности, в методе АКАР в качестве таких инвариантов выступают макропеременные, которые могут рассматриваться как *целевые модели* состояния динамической системы [11, 12].

Проблема адекватной модели и информации о состоянии динамической системы – это и ограниченность классов моделей нелинейных динамических систем, формализуемых в терминах дифференциальных уравнений моделями с *линейной параметризацией неопределенности*.

С другой стороны, значительное число физических процессов описывается нелинейными динамическими моделями с *нелинейной параметризацией*. Это, например, модели процессов в химических и биореакторах, модели трения в механических и биомедицинских системах, модели магнитного потока в индукционных моторах и магнитных подвесах, электромеханические клапаны, модели управляемых процессов в двигателях внутреннего сгорания, силовых установках кораблей и в перспективных силовых установках гидроводородного принципа действия (библиография по приведенным примерам приведена в [23]).

4. Четвертый круг проблем – это проблемы реализации *адаптивных регуляторов состояния* нелинейных динамических систем. Суть этих проблем состоит в том, что условием разрешимости задач адаптивного управления нелинейными объектами является, вообще говоря, возможность реализации точно таких же возмущений самим регулятором. Этот тезис известен в литературе как *принцип внутренней модели*. В задаче адаптивного управления нелинейными объектами этот тезис выдвигался многими авторами. Таким образом, с одной стороны, встает задача о выборе самой структуры адаптивного закона управления, удовлетворяющей принципу внутренней модели, а с другой – допускающей достижение целей управления.

Адаптация в нелинейных динамических системах. Распространенным является понимание адаптивности управляемых систем как *свойства*, достигаемого использованием совокупности методов теории управления, идентификации, оптимизации, численных методов, позволяющих строить такие управляемые системы. В *адаптивных системах* для сохранения заданных целевых свойств закон управления и (или) структура системы корректируются в зависимости от изменения свойств объекта управления или под воздействием внешних возмущений. Но еще в конце 50-х – начале 60-х годов прошлого столетия адаптивность рассматривалась

³ French M. An analytical comparison between the nonsingular quadratic performance of robust and adaptive backstepping designs // IEEE Trans. on Automatic Control. 2002. Vol. 47. № 4. P. 670–675.

как свойство динамических систем с *перестраиваемыми нелинейными* законами управления [25].

При решении задач адаптивного управления с учетом обозначенных ранее проблем в системах с неравновесной и неустойчивой целевой динамикой для широкого класса нелинейных динамических систем с использованием информации лишь качественного характера возникают проблемы:

1) описания управляемых объектов на языке, не требующем точного знания дифференциальных уравнений самого объекта;

2) использования математического аппарата для анализа соединений таких объектов (систем объектов) при условии возможной неустойчивости по Ляпунову положений равновесия, движений или целевых множеств в пространстве состояний объекта. Искомый математический аппарат должен позволять формулировать принципы *желаемой макроорганизации* адаптивных систем управления в виде ограничений в функциональных пространствах на свойства отображений "вход – выход", "вход – состояние" и макропеременные для управляемого объекта, регулятора и их соединений, выполнение которых:

а) гарантирует реализуемость, полноту и ограниченность состояний объекта и регулятора;

б) сохраняет все "типичные", желаемые, полезные нелинейные эффекты управляемого объекта, включая мульти- и метастабильность, неустойчивость по Ляпунову, неравновесность;

в) компенсирует влияние нежелательных эффектов в самом объекте, нежелательное влияние среды и влияние неопределенности информации об объекте для достижения целей управления.

Исходной информацией на данном этапе являются модели объекта с точностью до оценок отображений "вход – выход" и "вход – состояние" *по нормам в заданных функциональных пространствах*, а также принадлежность внешних сигналов (возмущений) к конкретным функциональным пространствам [23, 24].

Формулировка требований к адаптивному регулятору на языке ограничений в функциональных пространствах потенциально позволяет снять проблему устойчивости по Ляпунову целевых движений. Задача синтеза адаптивного регулятора сводится, в свою очередь, к решению проблемы обеспечения выполнения конкретных функциональных ограничений в нелинейных системах при условии возможной нелинейной параметризации неопределенностей. Исходной информацией для решения задачи синтеза являются макропеременные, классы моделей неопределенности, а также модели объекта с точностью до дифференциальных уравнений.

Новый подход к проблеме адаптивного управления в динамических системах с позиций *управляемой самоорганизации* основан на использовании макропеременных, формируемых на основе анализа правых частей дифференциальных уравнений объекта – в полном согласии с "программой Пуанкаре". Макропеременные служат моделями объектов в задачах синтеза алгоритмов адаптации нелинейных управляемых систем.

Сложная нелинейная динамика управляемых объектов, физических, химических, биологических процессов потенциально порождает большое разнообразие режимов их поведения, которые необходимо целенаправленно изменять или направлять их развитие во времени и пространстве. В технических системах эту роль выполняет – в соответствии с целевым условием – нелинейный адаптивный регулятор. Это эквивалентно выполнению упомянутого выше принципа необходимого разнообразия У.-Р. Эшби для реализации механизма адаптации, обладающего способностью к формированию "достаточного разнообразия" управляющих воздействий на объект.

Адекватное решение лежит, на наш взгляд, на стыке *нейроинформатики* и управления. Оба научных направления генетически связаны самым изначальным определением адаптации в физиологии, психологии и др. науках о животных и человеке. С другой стороны, искусственные нейронные сети в замкнутой нелинейной системе потенциально могут служить источниками как динамического хаоса, так и целенаправленного управления сложным по своей динамике объектом, причем с прогнозируемым качеством траекторий движения. Таков диапазон потенциальных возможностей соединения "динамическая система (объект) – нейронная сеть (регулятор)". Поэтому обучаемые искусственные нейронные сети, в частности многослойные нейронные сети (МНС) прямого распространения, являются достойным "кандидатом" на адекватные аппаратно-программные средства для реализации адаптивных функций в нелинейных динамических системах.

МНС представляет собой однородную вычислительную среду для реализации разнообразных задач управления с адаптацией не только на параметрическом, но и на алгоритмическом и, по-видимому, на структурном уровнях эволюции управляемых процессов. Ключевую роль в теоретическом обосновании эффективности применения МНС для формирования нелинейных алгоритмов управления играют *универсальные аппроксимационные* свойства многослойных сетей. На основе обобщенной аппроксимационной теоремы Стоуна–Вейерштрасса показано [26], что с помощью нелинейных нейронных сетей можно *сколь угодно точно* равномерно приблизить любую непрерывную функцию многих переменных на любом замкнутом ограниченном множестве переменных. Дополнительно отметим весьма высокую скорость аппроксимации, что важно с технической точки зрения. Аргументированное обоснование универсальности аппроксимационных свойств и применимости МНС для реализации нелинейных адаптивных управлений приводится в [23, разд. 4].

Способность МНС к обучению придает адаптивные свойства нейросетевым системам управления, а *параллельная* обработка векторной информации делает естественным их использование для управления многомерными объектами.

Основное назначение нейросетевого регулятора – управление нелинейной динамикой в условиях частичной неопределенности математической модели процесса. Разработка теории построения нейросетевого регулятора для *класса* нелинейных динамических объектов со сложной динамикой поведения во времени, т.е. *типового* для класса нелинейных моделей *нейрорегулятора*, является нетривиальной проблемой с неочевидной возможностью ее решения в сложных системах, где нелинейные процессы, в частности, последовательности бифуркаций приводят к появлению режимов (состояний системы) от упорядоченных, которым соответствуют особые точки или предельные циклы, до турбулентных, хаотических в виде странных аттракторов. Само понятие "цели управления" в таких системах нуждается, как уже отмечалось выше, в доопределении к общепринятым в "классической" теории управления целям, где достаточно просто формулируется цепочка "типовая модель" – "типовая цель" – "типовой закон". В нелинейных задачах управления такое едва ли возможно.

В нелинейных системах существует понятие "базовые модели динамики", например, модели с сильной положительной обратной связью с характерными для них режимами с обострением, проявляющимися, например, в моделях физики плазмы, моделях газовой динамики, в математических моделях экологии и экономики. Возможно, для конкретной типовой (базовой) модели формально существуют и остальные типовые составляющие приведенной выше цепочки. Однако в общем случае однозначный ответ на это замечание пока отсутствует. Тем не менее задача синтеза типовых нелинейных законов управления процессами в нелинейных системах может быть поставлена. Такая гипотеза может опираться на тот известный факт, что необходимое единство типовых моделей управляемых нелиней-

ных процессов обусловлено не единством (универсальностью) их математических моделей, как это имеет место в линейных моделях, а в универсальности (единстве) качественного поведения нелинейных систем, в частности в *ограниченности числа сценариев* бифуркационных процессов [5].

Сказанное выше аргументирует актуальность проблемы синтеза нелинейных управляемых динамических систем со свойствами адаптации. Однако представляется уместным напомнить слова одного из основоположников теории адаптивных систем Я.З. Цыпкина (1919–1997) [27. С. 22]: "... *хотя теперь принято говорить, что постановка проблемы составляет от 50 до 80 % успеха (в зависимости от темперамента говорящего это), тем не менее, оставшиеся проценты часто настолько емки, что могут лишить нас этого успеха вообще*". Тем не менее...

Что дальше? "... *Не дано никакого дифференциального уравнения. Описать свойства его решений*". Новые задачи и подходы к их решению определяют новые горизонты к средствам реализации управляемых динамических систем. Это относится как к собственно объектам, так и к средствам управления. Известно, что наилучшее из возможных управлений – его отсутствие. Но в таком случае объект должен быть спроектирован как *самоуправляемый*. Вероятно, в некотором недалеком будущем акценты в оценках роли теории управления в естествознании будут смещены в сторону *проектирования технологий* со свойствами контролируемого самоуправления, а не только для целей улучшения свойств управляемых технологий, спроектированных без привлечения теории управления, как это делается до настоящего времени.

В этот период наука об управлении как базовая для спектра специальностей по автоматизации и управлению в технических системах еще пока не вступила. Но какой смысл и в чем он состоит в выделенной цитате из упомянутой статьи Ю.С. Ильяшенко? Естественно, что в прямом смысле вряд ли ожидается описывать свойства решений не заданных дифференциальных уравнений так же, как это не делается в классической и современной теории управления. Тем не менее, именно по заданному уравнению объекта или его правой части в качестве исходной информации осуществляется синтез систем управления объектом. Таким образом, априорно предполагается свойство *управляемости*. В арсенале методов анализа теории управления имеются критерии управляемости, наблюдаемости, достижимости. Нелинейная динамика содержит аппарат анализа режимов функционирования нелинейных динамических систем. Отсюда возникает *обратная* задача, о которой речь уже шла выше: проектирование объектов и технологий с заложенными в них свойствами управляемости, особенностями поведения во времени, известными специалистам по управлению. Целью проектирования является достижение эффекта *целесообразного самоуправления* в новых технологиях будущего, т.е. в самих объектах, без использования дополнительных средств управления.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Ильяшенко Ю.С.* Аттракторы динамических систем и философия общего положения // Мат. просвещение. – Сер. 3. – 2008. Вып. 12. – С. 13-22.
2. *Винер Н.* Кибернетика. – 2-е изд. – М.: Сов. радио, 1968. – 258 с.
3. *Поваров Г. Н.* Ампер и кибернетика. – М.: Сов. радио, 1977. – 96 с.
4. *Храмой А.В.* Очерк истории развития автоматики в СССР. – М.: АН СССР, 1956. – 223 с.
5. *Малинецкий Г.Г.* Математические основы синергетики. Хаос, структуры, вычислительный эксперимент. Сер. "Синергетика: от прошлого к будущему". – 4-е изд. – М.: Ком-Книга, 2005. – 312 с.
6. Википедия: Теория управления.
7. *Красовский А. А.* Исторический очерк развития и состояния теории управления // Современная прикладная теория управления. Ч. I. – Таганрог: Изд-во ТРТУ, 2000. – 400 с.

8. *Леонов Г. А.* Введение в теорию управления. – СПб.: Изд-во С.-Петерб. ун-та, 2004. – 218 с.
9. Современная прикладная теория управления: Оптимизационный подход в теории управления. Ч. I. / Колл. авт. под ред. А.А. Колесникова. – Таганрог: Изд-во ТРТУ, 2000. – 400 с.
10. *Мирошник И.В., Никифоров В.О., Фрадков А.Л.* Нелинейное и адаптивное управление сложными системами. – СПб.: Наука, 2000. – 549 с.
11. Синергетика и проблемы теории управления / Под ред. А. А. Колесникова. – М.: Физматлит, 2004. – 504 с.
12. Современная прикладная теория управления: Синергетический подход в теории управления. Ч. II. / Колл. авт. под ред. А.А. Колесникова. – Таганрог: Изд-во ТРТУ, 2000. – 559 с.
13. *Белусов Б.П.* Периодически действующая реакция и ее механизм // Автоволновые процессы в системах с диффузией: Сб. науч. тр. – Горький: Изд-во ГГУ, 1951. – С. 76.
14. *Жаботинский А.М.* Концентрационные колебания. – М.: Наука, 1974. – 179 с.
15. *Ressler O.E.* Chemical Turbulence: Chaos in a Small Reaction-Diffusion System // Naturforsch. – 1976. – Vol. 31. – P. 1168-1172.
16. *Гукенхаймер Дж., Холмс Ф.* Нелинейные колебания, динамические системы и бифуркации векторных полей. – Москва–Ижевск: Институт компьютерных исследований, 2002. – 560 с.
17. *Lorenz E.N.* Deterministic Nonperiodic Flow // J. Atmos. Sci. — 1963. – Vol. 20, № 2. – P. 130-141.
18. *Википедия:* Нелинейное управление.
19. *Фрадков А.Л.* Кибернетическая физика: принципы и примеры. – СПб.: Наука, 2003. – 208 с.
20. *Фрадков А.Л.* О применении кибернетических методов в физике // УФН. – 2005. – Т. 175, № 2. – С. 113-138.
21. *Эшби У. Росс.* Введение в кибернетику. – М.: ИЛ, 1959. – 432 с.
22. *Терехов В.А., Тюкин И.Ю.* Эволюция и проблемы теории адаптивного управления // Мехатроника, Автоматизация, Управление. Ч. I. – 2003. – № 6. – С. 9-18. Ч. II. – 2003. – № 7. – С. 2-11.
23. *Тюкин И.Ю., Терехов В.А.* Адаптация в нелинейных динамических системах. Сер. Синергетика: от прошлого к будущему. – М.: Изд-во ЛКИ, 2008. – 384 с.
24. *Tyukin I.* Adaptation in Dynamical Systems. — UK, Cambridge University Press, 2011. – 410 p.
25. *Траксел Дж.* Самоадаптивные системы (обзорный доклад) // Тр. 2 Межд. конгресса ИФАК “Дискретные и самоадаптивные системы”. Базель, Швейцария. 28 авг. – 4 сент. 1963. – М.: Наука, 1965. – С. 240-251.
26. *Горбань А.Н.* Обобщение аппроксимационной теоремы Стоуна // Нейроинформатика и ее приложения: Материалы 5-го Всеросс. семинара. 3-5 октября 1997. – Красноярск: Изд-во КГТУ, 1997. – С. 59-62.
27. *Цыткин Я.З.* Адаптация и обучение в автоматических системах. – М.: Наука, 1968. – 400 с.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор А.А. Колесников.

Терехов Валерий Александрович

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ».

E-mail: terekhov.valery@gmail.com.

197376, Санкт-Петербург, ул. Проф. Попова, 5.

Тел.: 88123060271.

Д.т.н., профессор.

Terekhov Valery Alexandrovich

St.-Petersburg State Electrotechnical University «LETI».

E-mail: terekhov.valery@gmail.com.

5, Prof. Popova Street, St.-Petersburg, 197376, Russia.

Phone: +78123060271.

Dr. of Eng. Sc., Professor.