Изв.вузов «ПНД», т.8, № 4, 2000

УДК 001:519.711.3

ВЛИЯНИЕ ВРЕМЕННОГО ЗАПАЗДЫВАНИЯ НА ДИНАМИКУ ВЗАИМОДЕЙСТВУЮЩИХ НАУЧНЫХ НАПРАВЛЕНИЙ

Е.С. Мчедлова

Представлена математическая модель двух взаимодействующих научных направлений с учетом эффектов запаздывания. На основе результатов численного моделирования и представлений синергетики проводится сравнительный анализ и качественное сопоставление с явлениями в реальных системах.

Известно, что учет конечности времени распространения сигналов и информации при моделировании процессов в реальных системах представляется немаловажным. Данный подход становится особенно актуальным в тех случаях, когда это время соизмеримо с какими-либо характерными временными масштабами исследуемой системы, или если есть принципиальная необходимость сконструировать систему, управляемую временными задержками.

В настоящей работе в центре внимания находится моделирование систем, возникающих и эволюционирующих по законам природы и самоорганизации, являющихся по отношению к исследователю объективной реальностью. Очевидно, что вопрос об управлении такими системами или о «конструировании» новых остается открытым до тех пор, пока не проанализированы основные закономерности и не выяснены факторы, влиянием которых можно, либо нельзя пренебречь.

Очевидно, тем фактом, что скорость протекания процессов в научном сообществе как социальной системе является конечной величиной, зачастую значительной и соизмеримой с временными масштабами взаимодействий и эволюции самой системы, в большинстве случаев пренебречь нельзя [1–3]. Основываясь на уравнениях из работы [4], рассмотрим, каким образом можно учесть указанный эффект при взаимодействии двух научных направлений, а затем обратимся к результатам численного моделирования и их качественной интерпретации.

Классификация запаздываний при взаимодействии научных направлений и способы математического описания

Сохраняя концепцию экспоненциального роста научных достижений, ограниченного нелинейностью, остановимся на возможных способах учета инерции процессов при взаимодействии двух научных школ или направлений.

Классифицируя возможные запаздывания в подобной системе, приходим к выводу, что по своему происхождению они могут быть двух типов: так называемое запаздывание *в связях* и *собственное* запаздывание – в каждом из взаимодействующих направлений. Первое происходит за счет того, что информация между направлениями, распространяется не мгновенно, а за конечный интервал времени, который и определяет величину запаздывания. То, что информация спустя некоторое время достигла системы–«адресата», совсем не означает, что она будет принята во внимание немедленно, как и всё, на текущий момент времени происходящее в самой системе. Именно этим обусловлены запаздывания второго типа. Их изначальные причины, по всей видимости, имеют глубокие социальные и психологические корни.

Структура уравнений, используемых в [4] для описания взаимодействия двух научных направлений, позволяет на формальной основе разделить факторы экспоненциального роста достижений, нелинейных ограничений и взаимного влияния, что дает возможность непосредственно учесть оба типа запаздываний. Таким образом, приходим к следующей системе обыкновенных дифференциальных уравнений с запаздывающим аргументом:

$$\begin{aligned} \dot{x} &= c_1 x y_{\tau_{yc}} - c_2 x - b_1 x x_{\tau_x}, \\ \dot{y} &= c_3 y x_{\tau_{xc}} - c_4 y - b_2 y y_{\tau_y}, \end{aligned} \qquad (1)$$

где τ_{xc} и τ_{yc} – величины запаздываний в связях, τ_x и τ_y – собственные запаздывания каждого направления. Вводя запаздывания таким образом, мы полагаем их постоянными во времени, так как скорость хождения информации между двумя научными направлениями в среднем одинакова и мало изменяется с течением времени, а направления не изменяются по своей организации в ходе взаимодействия.

Обратим внимание, что только данный способ учета запаздывания в системе (1) не нарушает формальной структуры системы уравнений. В противоположность этому можно, например, все переменные в правой части системы (1) снабдить запаздывающим аргументом. Тогда запись (1) теряет смысл, поскольку дифференциальные уравнения выродятся в некие функциональные зависимости, а с точки зрения моделирования система никак не будет связана с текущим моментом: в правой части уравнений будут фигурировать только значения x и y, зависящие от $(t-\tau)$, и не останется переменных, зависящих от t.

Влияние разномасштабного запаздывания на динамику двух развивающихся научных направлений в случае их сотрудничества

Рассмотрим научные направления с изначально положительной динамикой (собственной тенденцией к развитию), оказывающие друг на друга положительное воздействие. Этот случай не рассматривался нами ранее из–за относительной тривиальности по сравнению с остальными типами взаимодействия, но сейчас он представляет полезный тестовый материал для изучения влияния запаздываний. Следует также отметить, что именно такой тип взаимодействия лежит в основе систем интеграции, о которых мы будем говорить несколько позже.

В отсутствие запаздываний в системе (1) ее решения через некоторый интервал времени достигают стационарного значения, величина которого зависит от параметра нелинейности (скорости потери актуальности научных результатов), величины коэффициентов связи и не зависит от начального состояния каждого из направлений. Система имеет четыре особые точки с неотрицательными координатами

$$1)\ x^* = y^* = 0;\quad 2)\ x^* = 0,\ y^* = 1/b_2;\quad 3)\ y^* = 0,\ x^* = 1/b_1;$$

$$4)\ x^* = (1+b_2)/(b_1 b_2 - 1),\ y^* = (1+b_1)/(b_1 b_2 - 1),$$

из которых первые три являются неустойчивыми, а последняя соответствует стационарному решению.

Решения системы (1) при наличии собственного запаздывания в каждом из научных направлений и в отсутствие запаздывания в связях представлены на рис. 1. Из сравнения серии графиков *а–ж* видно, что по мере увеличения запаздывания $\tau_x=\tau_y$ стационарное решение сменяется синхронными колебаниями; затем полный синхронизм нарушается, но колебания макропеременных во времени остаются синфазными, с существенно разной амплитудой; и, наконец, при $\tau_x=\tau_y=1.6$ поведение решений $x(t)$, $y(t)$ носит нерегулярный, хаотический характер. Дальнейшее увеличение $\tau_x=\tau_y$ при данных значениях нелинейностей $b_1=b_2=5.0$ приводит к потере системой устойчивости и является некорректным в контексте рассматриваемой модели.

Чтобы представлять, при каких соотношениях нелинейности и собственных запаздываний решения системы (1) остаются устойчивыми, а также определять их тип, была построена карта режимов системы в пространстве параметров b–τ, изображенная на рис. 2. По данной карте можно не только судить о характере решений в зависимости от «управляющих параметров», но и произвести условную классификацию собственных запаздываний по их относительной величине. По причине отсутствия нормировки модели по конкретным числовым данным (что вообще весьма затруднительно для социальных систем), представляется необходимым определить количественную меру «много – мало» в отношении величин запаздываний. Следуя границам режимов, построенным на карте, относительно малыми будем считать значения, при которых в системе еще реализуется стационарное решение либо синхронные колебания. Верхняя граница значений запаздывания τ соответствует границе, разделяющей области устойчивых и неустойчивых решений, и поэтому, если τ близко к граничному, будем считать, что оно относительно велико. Следуя данным рассуждениям и обращаясь к рис. 2, нетрудно объяснить, почему решения системы, представленные на рис. 1, были построены при $b_1=b_2=5$. Так, например, в достаточно большом диапазоне нелинейностей b при малых изменениях τ система быстро выходит в режим неустойчивых решений; богатство динамики системы может наблюдаться только при существенно больших значениях параметров нелинейности (b>4÷5).

В случае, если начальные условия одинаковы и вносится малая расстройка собственных запаздываний (см. рис. 2, *и–л*), это приводит к существенной десинхронизации решений, которые имеют сильно нерегулярный характер. В совокупности с результатами, изображенными на рис. 1, *а–ж*, это приводит к выводу о том, что сравнительно небольшая разница в собственных запаздываниях научных направлений при одинаковых начальных состояниях оказывает не меньший эффект, чем достаточно большие, но идентичные запаздывания при относительно большой разнице в начальных условиях.

Большая разница в масштабах запаздывания в направлениях X и Y при разных начальных условиях приводит к установлению в системах периодических колебаний с разной амплитудой, причем колебания в системе с большим запаздыванием имеют большую амплитуду (см. рис. 1, *з*, *и*)

Если в системе двух взаимодействующих научных направлений присутствует только запаздывание в связях и нет других временных задержек (рис. 3), то с течением времени решения $x(t)$, $y(t)$ обязательно примут синхронный, а затем и стационарный характер, с той лишь разницей, что при увеличении запаздывания в связях время переходного процесса увеличивается.

И, наконец, на рис. 4 представлены зависимости переменных $x(t)$, $y(t)$ при наличии запаздывания как в самих системах, так и в связях. Из сравнения рис. 1, *г* и рис. 4, *а*, *б* следует, что при $\tau_x=\tau_y=1.3$ добавление одностороннего запаздывания в связь приводит к тому, что колебания переменных, оставаясь регулярными, оказываются сдвинутыми по фазе друг относительно друга. Относительно

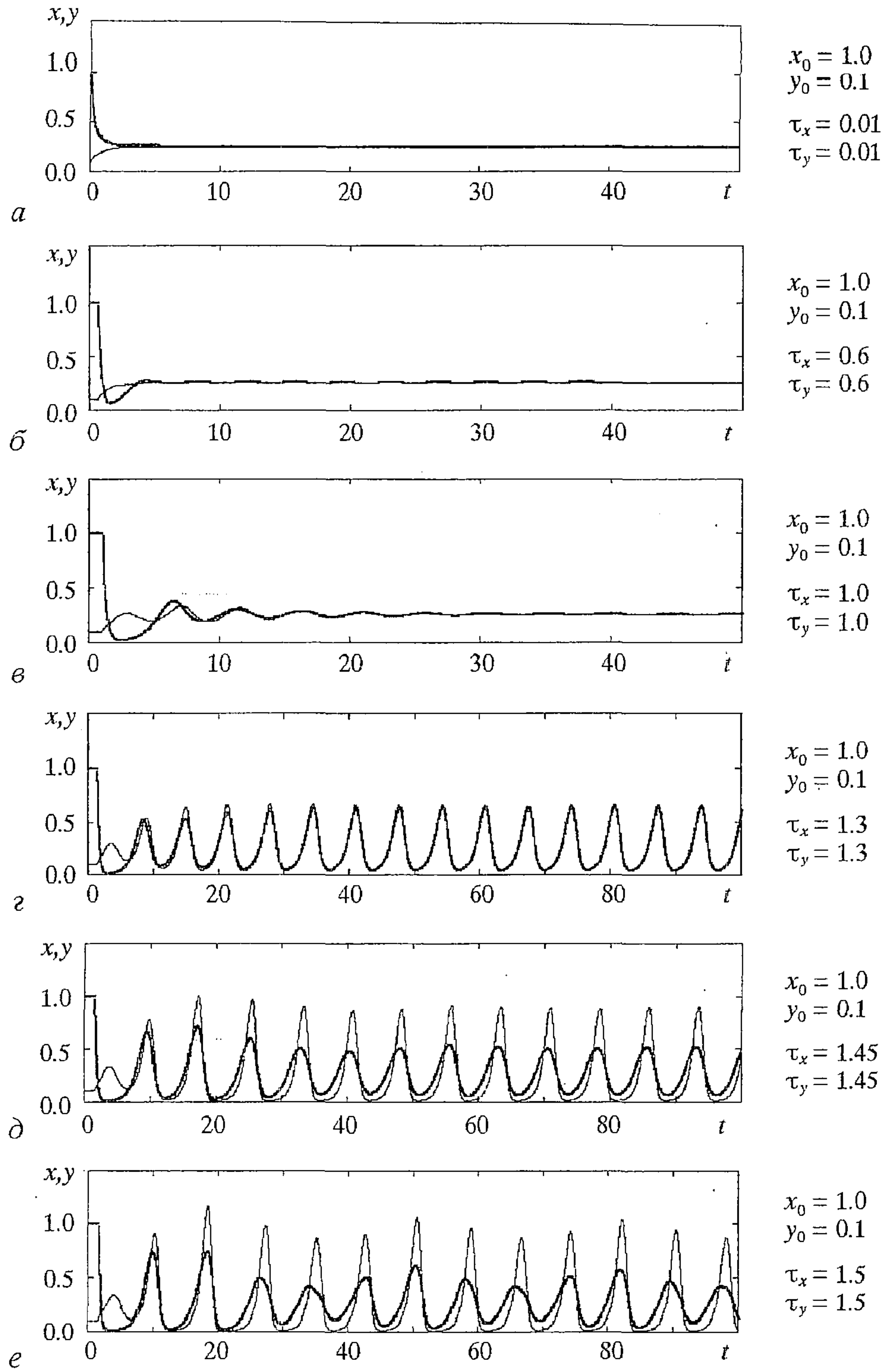

Рис. 1. Зависимости переменных $x(t)$, жирная линия, и $y(t)$, светлая линия: для случая $b_1=b_2=5$, $c_1=c_3=1$, $c_2=c_4=-1$; в отсутствие запаздывания в связях $\tau_{xc}=\tau_{yc}=0.01$; для разных значений начальных условий x_0,y_0; при наличии запаздывания в каждой из взаимодействующих систем τ_x, τ_y

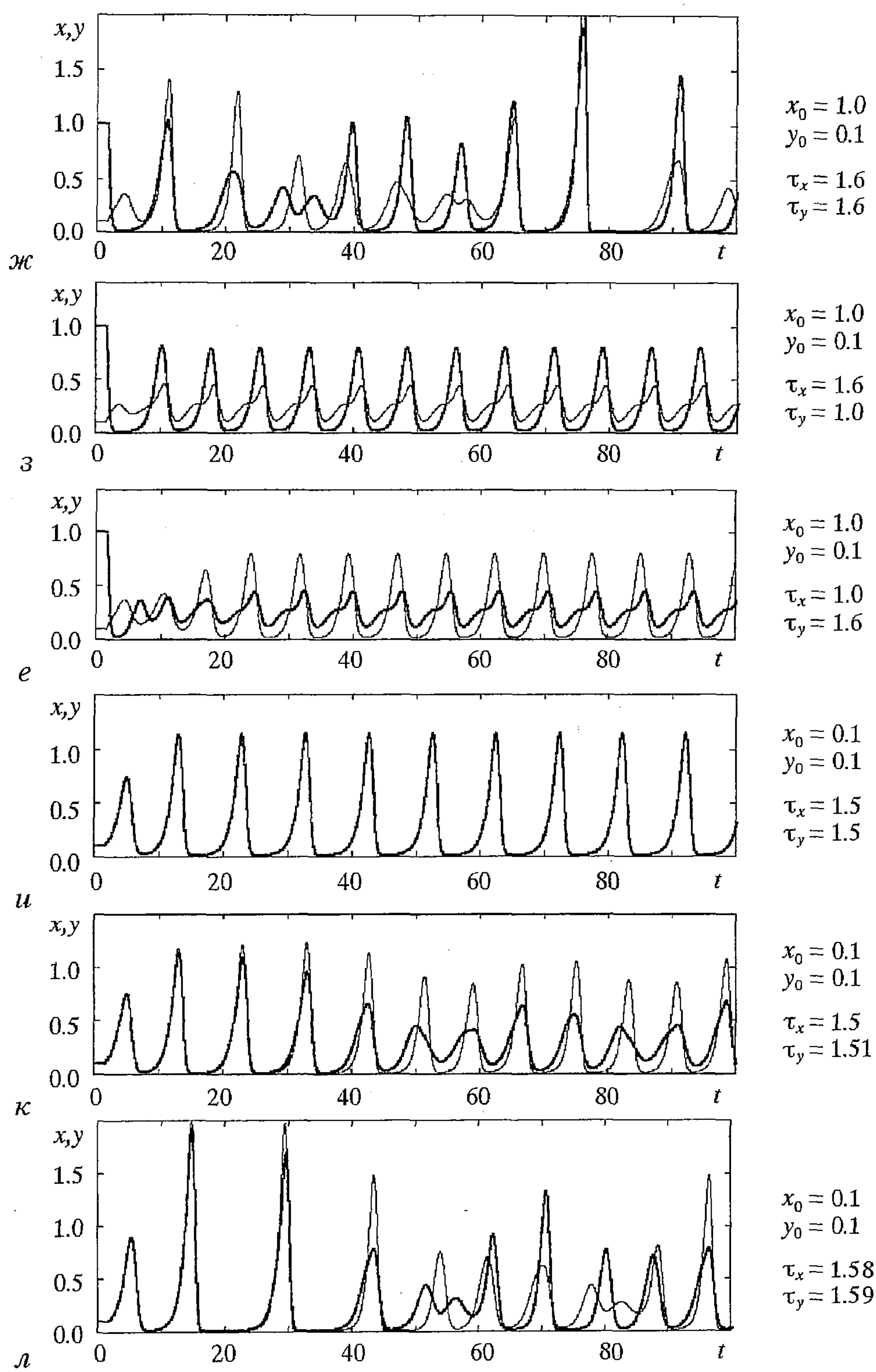

Рис. 1. Продолжение

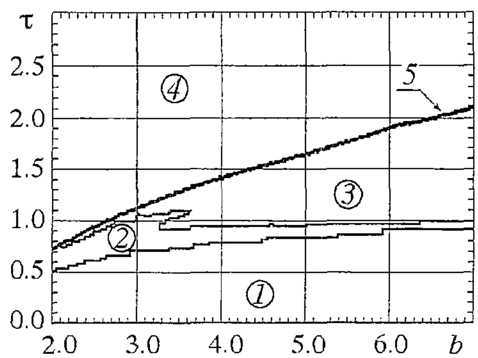

Рис. 2. Карта режимов системы (1) в пространстве параметров τ, b, где $\tau=\tau_x=\tau_y$, $b=b_1=b_2$, запаздывание в связях отсутствует, $c_1=c_3=1$, $c_2=c_4=-1$, $x_0=0.2$, $y_0=0.1$. Цифрами обозначены различные режимы колебаний, реализующиеся в системе при указанных значениях параметров: *1* – стационарный режим; *2* – синхронные колебания; *3* – периодические и сложные несинхронные колебания; *4* – решения системы неустойчивы; *5* – граница, разделяющая области устойчивых и неустойчивых решений

большие одинаковые запаздывания в связях при наличии собственных запаздываний $\tau_x=\tau_y=1.3$ при разнице в начальных условиях приводят к противофазным колебаниям $x(t)$, $y(t)$ (см. рис. 4, *в–д*). Малая расстройка запаздываний в связи при одинаковых начальных условиях и $\tau_x=\tau_y=1.5$ приводит к десинхронизации решений с течением времени и установлению достаточно сложного режима колебаний, когда изменения переменных нерегулярно и противофазно.

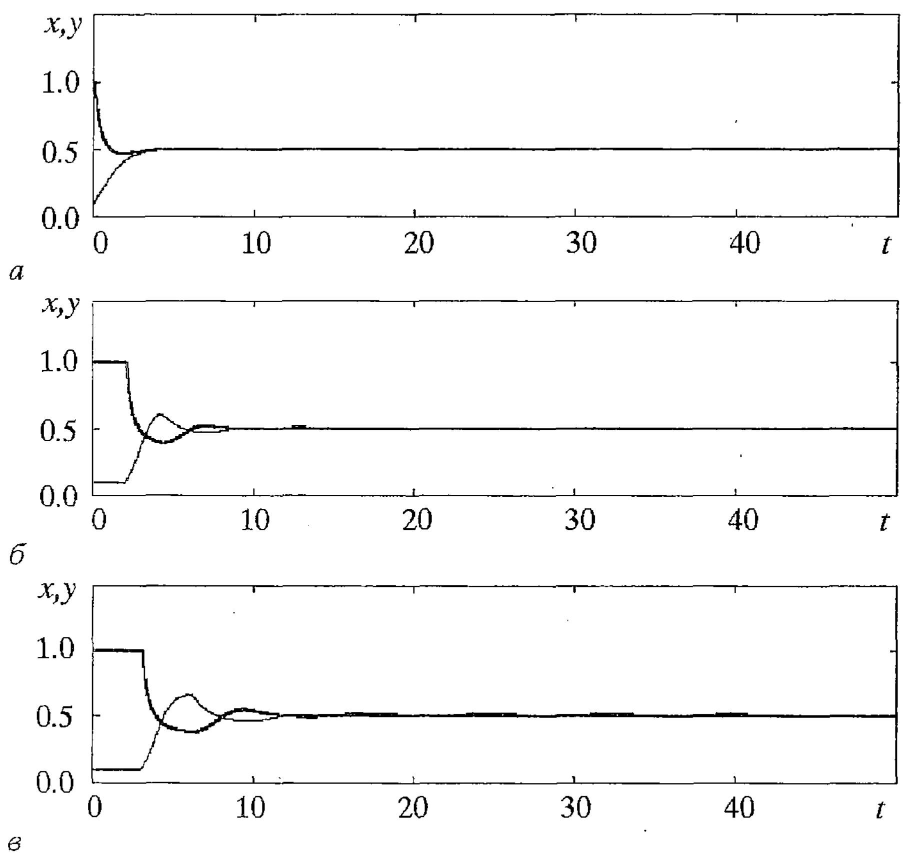

Рис. 3. Зависимости переменных $x(t)$, жирная линия, и $y(t)$, светлая линия: для случая $b_1=b_2=3$, $x_0=1.0$, $y_0=0.1$, $c_1=c_3=1$, $c_2=c_4=-1$; в отсутствие запаздывания в системах, при наличии запаздывания в связях $\tau_{xc}=\tau_{yc}$: *а* – 0.01; *б* – 2.0; *в* – 3.0

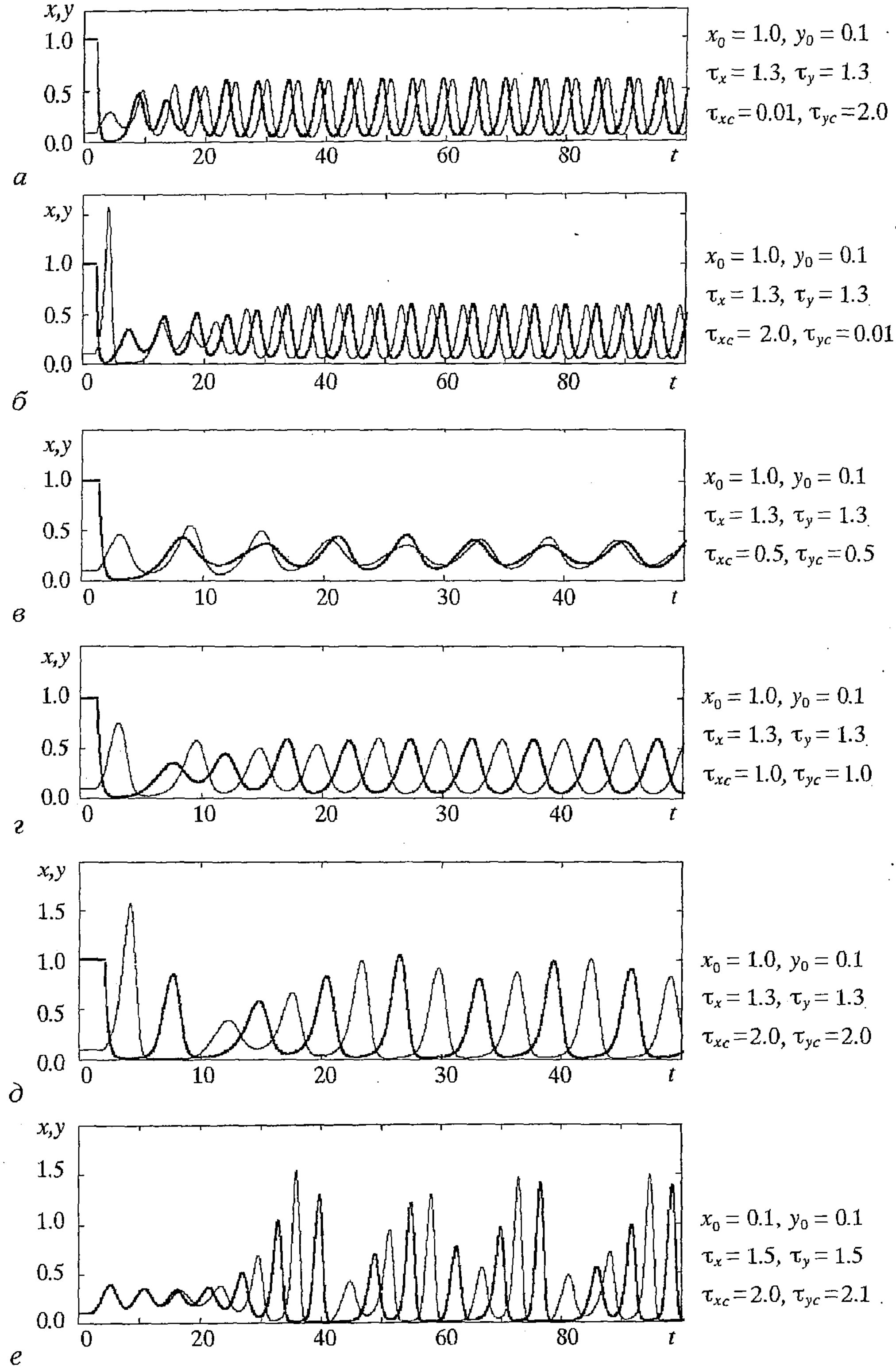

Рис. 4. Зависимости переменных $x(t)$, жирная линия, и $y(t)$, светлая линия: для случая $b_1=b_2=5.0$, $c_1=c_3=1$, $c_2=c_4=-1$; различных начальных условий x_0 и y_0, запаздывания в связях τ_{xc} и τ_{yc}, различных уровнях запаздывания в самих системах $\tau_x=\tau_y$

Заключение

Обращаясь к исследованиям модельных систем, предложенных в настоящей работе, проанализируем полученные результаты в контексте тенденций объединения и взаимодействия – интеграционных процессов в науке и высшей школе.

Оказалось, что учет конечности времени распространения информации между научными направлениями дает возможность увидеть совершенно новые аспекты взаимодействий в научном сообществе. Так, величина запаздывания в связях может служить показателем «объединенности» (разобщенности) научных школ или направлений: малое запаздывание, как правило, характерно для научных направлений, локализованных в рамках одной организации.

Запаздывания, учтенные в модели, позволили уйти от стационарных решений, когда показатели научных направлений оставались постоянными с течением времени. Отдавая себе отчет в том, что такое постоянство есть следствие идеализации, мы внесли в модель фактор, который позволил перейти к колебательным процессам, гораздо в большей степени соответствующим природе моделируемых взаимодействий. Выяснилось, что относительно небольшие временные запаздывания приводят к колебаниям макропеременных, характеризующих состояние научных направлений.

Так, при рассмотрении сотрудничества развивающихся направлений, увеличение времен запаздываний приводит к изменению динамики системы от синхронных периодических до нерегулярных и хаотических несинхронных колебаний научных показателей. Нерегулярный, сложный характер изменения макропеременных во времени при больших временных задержках делает практически невозможным поиск закономерностей в поведении реальной системы, процессы становятся непредсказуемыми. Возникают проблемы с управлением и прогнозированием поведения таких систем.

В противоположность этому, периодические и синхронные изменения макропеременных, характеризующих уровень развития взаимодействующих научных направлений, позволяют делать прогнозы и представляются выгодными с точки зрения управления. Для класса моделируемых нами систем синхронные процессы хороши, прежде всего, тем, что взаимодействующие системы ведут себя как одна, а это означает интеграцию двух направлений в полном смысле этого слова. Синхронизированные системы ведут себя как единое целое, и в дальнейшем могут рассматриваться как элементарные структуры систем более высокого уровня иерархии. Время, за которое достигается синхронное состояние, является, по сути, показателем эффективности взаимодействия и, как выяснилось, зависит от запаздываний (как в связях, так и в самих системах). Тогда общая тенденция такова: чем больше запаздывание при взаимодействии научных направлений, тем дольше в такой системе не устанавливается синхронный режим (либо он не установится вообще), что отдаляет ее от систем интеграции. Поскольку запаздывание в связях напрямую зависит от скорости распространения информации между научными направлениями или школами, то можно заключить, что данное запаздывание есть эквивалент расстояния между системами. Обобщая сказанное, приходим к выводу, что взаимодействие будет более эффективным, если интегрируемые системы локализованы в одном месте (например, в научно–исследовательском комплексе).

Практическое подтверждение выводов, сделанных на основании моделирования системы взаимодействующих научных направлений, представлено в работах [5,6], в которых наглядно демонстрируются преимущества объединения исследовательских коллективов и учебных заведений в рамках крупных университетских центров с большим числом научных лидеров, сформировавшихся школ и эффективных научных связей.

Автор выражает благодарность профессору Д.А. Усанову за плодотворные обсуждения, без которых данная работа вряд ли была бы возможна.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского гуманитарного научного фонда (проект 000–06–00268а) и гранта Министерства образования РФ (проект 97–0–8.3–41).

Библиографический список

1. *Качак В.В., Мчедлова Е.С.* Нелинейная система с запаздывающим аргументом применительно к моделированию взаимодействий в науке // 5–я Международная школа ХАОС'98. Саратов, 6 – 10 октября 1998. С.111.

2. *Mchedlova E.S.* The model of two time–delayed systems: from periodicity to chaos // 5th International School on Chaotic Oscillations and Pattern Formation. Saratov, Russia. October 6 – 10.1998. P.109.

3. *Измайлов И.В., Пойзнер Б.Н., Раводин В.О.* Модель взаимодействия двух развивающихся научных направлений с учетом ограничения роста достижений и запаздывания // Изв. вузов. Прикладная нелинейная динамика. 2000. Т. 8, № 1. С.70.

4. *Качак В.В., Мчедлова Е.С.* Модель взаимодействия двух научных направлений с учетом ограничения экспоненциального роста достижений // Изв. вузов. Прикладная нелинейная динамика. 1998. Т. 6, № 2. С. 85.

5. *Качак В.В., Усанов Д.А.* К вопросу о взаимодействиях научных школ или об одном аргументе «за» интеграции образовательных структур // Изв. вузов. Прикладная нелинейная динамика. 1998. Т. 6, № 2. С.95.

6. *Трубецков Д.И., Кузнецов Н.И., Усанов Д.А.* Интеграция – бремя ожиданий: Социально–экономические аспекты интеграции в системе образования и науки. Саратов: Изд–во ГосУНЦ «Колледж», 1998. 72 с.

Саратовский государственный университет

Поступила в редакцию 7.09.2000

THE INFLUENCE OF TIME DELAY ON INTERACTING SCIENTIFIC FIELDS DYNAMICS

E.S. Mchedlova

The mathematical model of two interacting scientific fields with time delays is presented. On the base of numerical simulation results and with synergetic approach the comparative analysis and qualitatively comparison with real systems behaviour is performed.