

Методы принятия решений

Применение нейронных сетей для детектирования источника возмущений в сетевых структурах*

О. В. ФРИДМАН, А. Я. ФРИДМАН

Аннотация. Рассматривается применение нейронных сетей для детектирования источника возмущений при использовании градиентного метода координации децентрализованного управления сетевыми структурами на основе предложенных ранее необходимых и достаточных условий координируемости локально организованной иерархии динамических систем. За счет этого ограничивается зона распространения возмущений, и повышается эффективность использования ресурсов на обслуживание подобных систем.

Ключевые слова: координация, управление, нейронные сети.

Основная задача теории и практики управления состоит в поиске управляющих воздействий, способных улучшить поведение системы в смысле достижения определенных заранее целей. Для децентрализованных систем требуется скоординировать взаимодействия подсистем.

В управлении координация — упорядочение и согласование работы различных элементов системы в процессе их совместной деятельности — есть центральная функция процесса управления, обеспечивающая его бесперебойность и непрерывность. Главная задача координации — достижение согласованности в работе всех звеньев системы путем установления рациональных связей (коммуникаций) между ними. Характер этих связей может быть самым различным, так как зависит от координируемых процессов.

Далее описан метод координации, основанный на предложенных в [2] необходимых и достаточных условиях координируемости локально организованной иерархии динамических систем.

Опишем кратко постановку задачи.

В качестве объекта координации вначале рассматривалась двухуровневая иерархическая система управления линейным объектом, затем полученные результаты были обобщены для объекта с сетевой структурой. Особенность подобных объектов по сравнению с иерархическими состоит в том, что в них все или большинство лиц, принимающих решения, имеют равный ранг. Пример — задачи формирования виртуальных предприятий [12]. Координация таких систем может производиться только на метауровне.

Цель анализа состояла в выявлении диапазонов устойчивости локальных управлений и координирующих сигналов к небольшим изменениям динамических характеристик объекта управления (вариациям матрицы динамики объекта). Кроме того, исследовались возможности повышения быстродействия децентрализованной системы управления.

Для применения разрабатываемого авторами ситуационного подхода к моделированию и, в частности, к координации сложных динамических комплексов [3] изучаемая динамическая система должна быть представлена в виде иерархически упорядоченного множества объектов (составных частей).

* Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проекты № 11–08–00641, 12–07–00550, 12–07–689), ОНИТ РАН (проект 2.3 Программы фундаментальных научных исследований) и Президиума РАН (проект 4.3 Программы № 16).

Эта иерархия отражает организационные взаимоотношения объектов. Критерий качества работы каждого объекта имеет вид:

$$\Phi ::= \left(\frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \left(\frac{a_i - a_{i0}}{\Delta a_i} \right)^2 \right)^{1/2} ::= \left(\frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \delta a_i^2 \right)^{1/2}, \tag{1}$$

где: a_i — сигналы из списка выходных параметров данного объекта, их общее количество равно m ;

a_{i0} и $\Delta a_i > 0$ — настроечные параметры, отражающие требования вышестоящего объекта к номинальному значению a_i и допустимому отклонению Δa_i от этого значения соответственно;

$\delta a_i ::= \frac{a_i - a_{i0}}{\Delta a_i}$ — относительное отклонение фактического значения сигнала a_i от его номинального значения a_{i0} .

Если считать a_i скалярными критериями качества работы элемента модели, номинальные значения которых определяются величинами a_{i0} , то (1) представляет собой обобщенный критерий с коэффициентами важности [11], обратно пропорциональными допустимым отклонениям скалярных критериев, что не противоречит здравому смыслу.

Из (1) также следует, что для координации применяется способ прогнозирования взаимодействий. Глобальная задача ставится путем выбора доминирующего скалярного критерия, который должен вносить минимальный вклад в обобщенный критерий (1). Пусть для определенности это будет $a_{i_0}^{(0)}$.

Рассмотрим возможности применения критерия (1) для координации локальных управлений при управлении иерархическими и сетевыми объектами.

Будем без потери общности рассматривать двухуровневую систему (рис. 1), в которой объект верхнего уровня (координатор) O_0 , имеющий обобщенный критерий качества Φ_0 типа (1), передает подчиненным ему объектам (подобъектам) $O_1 \dots O_n$, имеющим аналогичные критерии качества, настроечные параметры и получает в качестве сигналов обратной связи относительные отклонения фактических значений локальных критериев качества подобъектов от их номинальных значений. Подобъекты взаимодействуют через управляемую систему и не имеют информации о состоянии других подобъектов, то есть вся система локально организована.

Предлагаемый принцип координации такой системы с точки зрения системного анализа соответствует внешнему (объективному) подходу к оценке эффективности функционирования подсистем в составе метасистемы. Этот принцип состоит в следующем: задачи подобъектов будут скоординированы относительно задачи координатора, если знак градиента обобщенного критерия координатора по его те-

кущему доминирующему скалярному критерию совпадает со знаками градиентов этого обобщенного критерия по всем текущим значениям скалярных критериев подобъектов.

Из (1) имеем:

$$\frac{\partial \Phi_k}{\partial a_i^{(k)}} = \frac{2}{m_k} \frac{a_i^{(k)} - a_{i0}^{(k)}}{\Delta^2 a_i^{(k)}}, \tag{2}$$

откуда следует, что знак производной можно менять нужным образом, выбирая величину $a_{i0}^{(k)}$ больше или меньше $a_i^{(k)}$. С другой стороны, если считать, что действия всех подобъектов равно важны для достижения цели координатора (возможность обобщения очевидна), то:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \Phi_0}{\partial a_i^{(k)}} &= \sum_{j=1}^{m_0} \frac{\partial \Phi_0}{\partial a_j^{(0)}} \frac{\partial a_j^{(0)}}{\partial a_i^{(k)}} = \frac{2}{m_0} \sum_{j=1}^{m_0} \mu_j \frac{\partial a_j^{(0)}}{\partial a_i^{(k)}} \approx \\ &\approx \frac{2}{nm_0} \sum_{j=1}^{m_0} \mu_j \frac{Inc [a_j^{(0)}]}{Inc [a_i^{(0)}]}, \end{aligned} \tag{3}$$

где обозначено: $\mu_j = \frac{a_j^{(0)} - a_{j0}^{(0)}}{\Delta^2 a_j^{(0)}}$, а $Inc [*]$ есть приращение (инкремент) параметра в скобках за предыдущий временной шаг.

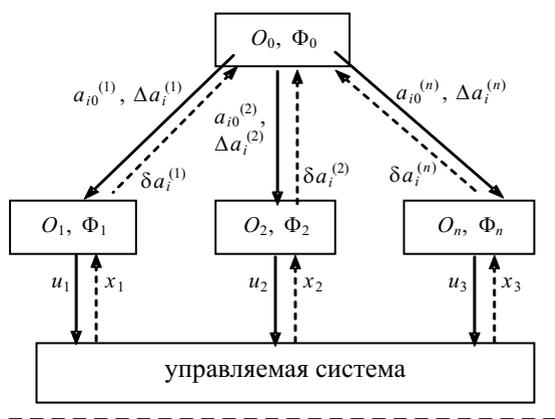


Рис. 1. Двухуровневая многоцелевая система

Система будет координируема, если координатор выберет все $a_{i_0}^{(k)}$ таким образом, чтобы знаки величин (2) (для $k=0$ и $i=1$) и (3) (для всех k от 1 до n и всех i для каждого подобъекта) совпадали.

Полученные достаточные условия координируемости аналогичны идеям обеспечения устойчивости локального управления в коллективах автоматов [13], где требуется положительность частных производных обобщенного критерия типа (1) по входным параметрам соответствующего элемента коллектива.

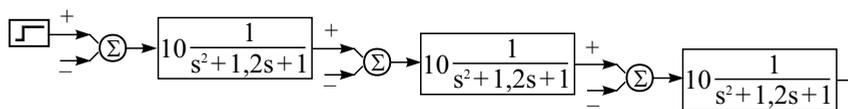


Рис. 2. Схема модели управляемой системы

С целью подтверждения теоретических результатов на математической модели исследовалась устойчивость характеристик децентрализованного управления на основе градиентов локальных критериев качества и возможности повышения (оптимизации) быстродействия децентрализованной системы.

Моделирование иерархической системы проводилось на примере управляемого объекта, представляющего собой три последовательно соединенных линейных звена с передаточной функцией второго порядка, одним управляющим входом и одним выходом каждый. Рассматривалась двухуровневая система управления (см. рис. 1).

В качестве управляемой системы при моделировании использовалась линейная трехблочная система, схема которой приведена на рис. 2.

Общее уравнение системы имеет вид:

$$\dot{x} = Ax + Bu, \tag{4}$$

где матрица динамики

$$A = \begin{pmatrix} A_1 & K_{12} & K_{13} \\ & A_2 & K_{23} \\ & & A_3 \end{pmatrix}, \tag{5}$$

матрица управления

$$B = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}, \tag{6}$$

вектор управления

$$u = \begin{pmatrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \end{pmatrix}, \tag{7}$$

вектор состояния

$$x = \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{pmatrix}. \tag{8}$$

Здесь K_{12} , K_{13} , K_{23} — коэффициенты структурных возмущений, назначение которых изменяет собственные числа матрицы динамики.

В качестве возмущений рассматривались перекрестные связи между отдельными блоками управляемой системы, изменяющие собственные числа матрицы динамики системы. Возмущающий коэффициент K_{ij} обозначает подачу сигнала на вход i -го блока с выхода j -го блока. Таким образом, для трехблочной системы рассматриваются коэффициенты структурных возмущений K_{12} , K_{13} , K_{23} .

В ходе эксперимента были исследованы все возможные сочетания подключений возмущающих воздействий — по одному, попарно, все три одновременно. Эксперимент показал, что наиболее значимое воздействие на устойчивость системы оказывает изменение K_{13} , а наименьшее — изменение K_{12} . Кроме того, были выявлены диапазоны изменений коэффициентов, в пределах которых система оставалась устойчивой с заданной 5 %-й точностью.

Были построены три аналогичных друг другу управляющих элемента нижнего уровня, соответствующие элементам второго уровня на рис. 1. В каждом из них вычисляется градиент обобщенного критерия (2), его значения подаются в качестве управляющего воздействия на вход каждого из трех блоков управляемой системы.

Управляющие элементы нижнего уровня использовали для принятия решений (выработки управляющих воздействий) локальную информацию о состоянии подчиненных им звеньев управляемого объекта, координатор обладал полной информацией о состоянии этого объекта и управляющих элементов нижнего уровня, что соответствует принципам теории иерархических систем.

Блок координации, который соответствует верхнему блоку на рис. 1, содержит три одинаковых подблока. На вход каждого подблока координатора подается фактическое значение сигнала a_i , номинальное значения сигнала a_{i0} , и рассчитывается относительное отклонение фактического значения сигнала a_i от его номинального значения $a_{i0} - \delta a_i ::= (a_i - a_{i0})/\Delta a_i$.

Далее вычисляется «новое» номинальное значение $a_{i0}' = a_{i0} + \Delta a_{i0}$, где $\Delta a_{i0} = k_i \delta a_i$. Значение коэффициента k_i изначально полагается равным единице. На следующем этапе оно изменялось для повышения быстродействия системы.

Компьютерный эксперимент проводился с помощью системы визуального блочного математического моделирования VisSim [1].

На следующем этапе исследований по методике, разработанной для иерархической управляемой системы [6], проведено моделирование децентрализованной системы управления сетью объектов [4; 5; 7–9]. Моделирование проводилось в несколько этапов:

- проанализирована устойчивость исследуемой системы к внешним возмущениям;
- определены диапазоны устойчивости системы к малым внутренним возмущениям, реализованным путем добавления обратных связей между выходами и входами узлов сети (в направлении от общего выхода системы к общему входу);
- определены диапазоны устойчивости системы при поочередном подключении управления на каждый узел сети. Управления задавались пропорционально градиенту обобщенного критерия (2), значения градиента критерия подавались в качестве управления по одному на вход каждого из возбуждаемых узлов сети;
- исследовано поведение системы при одновременном подключении всех управляющих элементов, возбуждение подавалось только на один узел сети, определены диапазоны устойчивости для такой ситуации.

Следующим шагом эксперимента было подключение координатора, построенного аналогично иерархической системе. Исследовано подключение блока координации только на возбуждаемый узел и полное подключение координатора (на все узлы сети) с одиночным подключением управления (на возбуждаемый узел сети) и полным подключением управления (на все узлы сети). Полученные результаты представлены в работах [4; 5; 7–9].

В целом по результатам моделирования подтверждена эффективность предложенного градиентного метода координации. Но выявлен и недостаток, состоящий в том, что при появлении возмущения в одном узле сети на него вынуждены реагировать и другие узлы, то есть координатор заставляет и другие управляющие элементы нижнего уровня менять свои решения без необходимости, что в реальной жизни неоправданно.

Поэтому далее был разработан метод поиска возмущенного узла(ов) моделируемой системы для последующего подавления распространения возмущений на другие узлы. Для решения этой задачи в качестве «поискового» блока предложено использовать нейронную сеть. На рис. 3 представлена упрощенная схема исследуемой системы.

Моделировались нейронные сети с различной структурой, такие как линейный слой, однонаправленная сеть, каскадная направленная сеть, перцеп-

трон, самоорганизующаяся карта Кохонена. Наиболее подходящей признана сеть Кохонена, на базе которой смоделирован нейросетевой блок.

Нейросетевой блок представляет собой 9 сетей Кохонена, каждая из которых получает сигнал с соответствующих блоков моделируемой системы. Обучение производится на идеальном сигнале, каждая сеть учится распознавать возмущение на соответствующем узле системы.

В настоящее время исследована распознавательная способность нейроблока при подаче внешнего возмущения на каждый узел моделируемой системы на разных временах моделирования. Оказалось, что по величине диапазонов устойчивости обратные связи между узлами сети можно условно разбить на «сильные», возмущение которых значительно изменяет реакцию системы, и «слабые». «Сильные» связи замыкаются в основном на три первых узла сети. Как показали исследования, на внешнее возбуждение реагируют только «сильные» узлы системы. Нейроблок успешно определяет номера узлов, на которые подается одиночное внешнее возмущение в диапазоне времен моделирования 10–100 % с амплитудой, как большей, так и меньшей, чем в обучающей выборке во всем диапазоне времен моделирования. Кроме того, исследовались ситуации, когда возмущение разной амплитуды подавалось на несколько узлов моделируемой системы. Проведены исследования по определению возбужденных узлов моделируемой системы.

Следующим этапом работы является полное подключение управления и координации (на все узлы моделируемой системы) при использовании нейросетевого блока для получения информации о локализации возмущения в системе. Нейроблок определяет возмущенные узлы системы, и эта информация подается на вход координатору для компенсации воздействия на возбужденный узел, т. е. координирующее воздействие подается не на все узлы, а только на возмущенные. В табл. 1 приведены результаты сравнения компенсирующего воздействия координатора без информации нейроблока и с его использованием.

Проведены исследования по оценке эффективности работы нейроблока в случае внешнего возбуждения, подаваемого на несколько узлов сети. В таблицах 2, 3 приведены результаты этих исследований.

Исследования показали, что эффективность работы нейроблока с ростом числа возбуждаемых блоков падает, как с точки зрения уменьшения установленной погрешности, так и времени компенсации для возбуждаемых блоков.

Проведены исследования по реакции «невозбуждаемых» узлов в случае внешнего возбуждения.

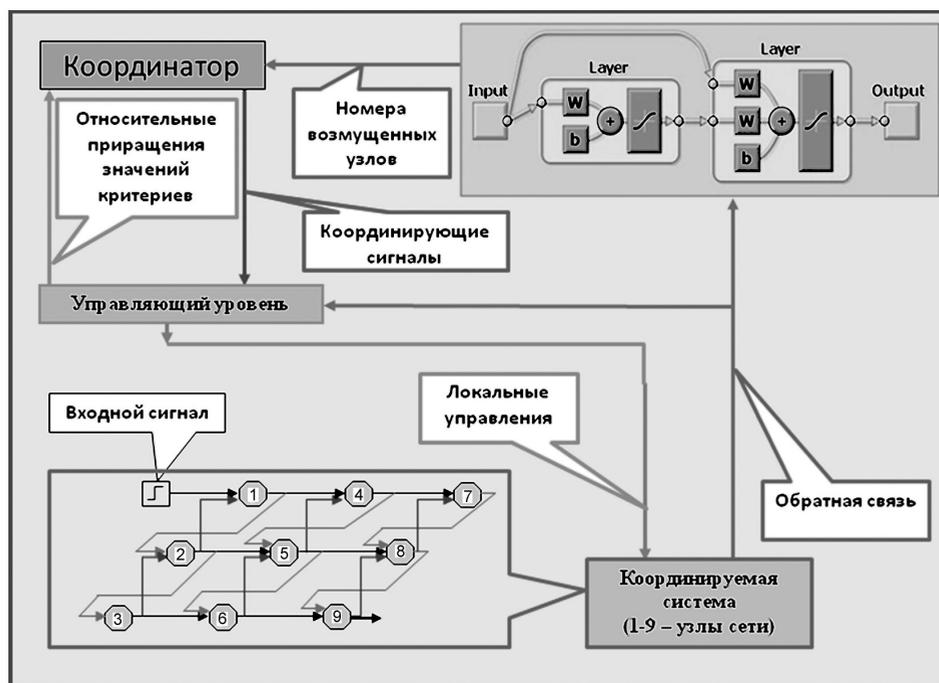


Рис. 3. Упрощенная схема моделируемой системы

Таблица 1

Значения установившейся погрешности (%) при возбуждении одиночных узлов системы

Способ подключения	Уровень возбуждения	Номер возбуждаемого узла		
		1 узел	2 узел	3 узел
Координация	20 %	-24,87	2,68	-24,6
Координация + сеть		-20,01	1,98	-19,9
Координация	10 %	-12,43	1,2	-24,7
Координация + сеть		-10,04	0,99	-9,94
Координация	7 %	-8,7	0,69	-8,6
Координация + сеть		-7,03	0,59	-6,95
Координация	5 %	-6,21	0,52	-6,14
Координация + сеть		-5,01	0,42	-4,97

Таблица 2

Значения установившейся погрешности (%) при попарном возбуждении узлов системы

Способ подключения	Уровень возбуждения	Номера возбуждаемых узлов		
		1 и 2 узел	1 и 3 узел	2 и 3 узел
Координация	5 %	-5,59	-12,36	-5,52
Координация+сеть		-4,53	-10,07	-4,57

Таблица 3

Значения установившейся погрешности (%) при одновременном возбуждении трех первых узлов системы

Способ подключения	Установившаяся погрешность и время компенсации					
	Уровень возбуждения					
	5 %		10 %		20 %	
Координация	-11,74	20 с	-23,5	20 с	-46,96	20 с
Координация+сеть	-9,23	10 с	-19,8	15 с	-39,6	20 с

Таблица 4

Диапазоны устойчивости при подаче малых структурных возмущений на узлы системы

«Сильные» связи		«Слабые» связи	
Подключение	Диапазон устойчивости	Подключение	Диапазон устойчивости
Связь 3–1		Связь 5–4	
Полное управление и коорд.	0,00005 ÷ -0,00005	Полное управление и коорд.	0,35 ÷ -0,24
С выборочной координацией	0,000052 ÷ -0,00005	С выборочной координацией	0,39 ÷ -0,25
Связь 4–3		Связь 9–8	
Полное управление и коорд.	0,000005 ÷ -0,000005	Полное управление и коорд.	0,1 ÷ -0,1
С выборочной координацией	0,000007 ÷ -0,000007	С выборочной координацией	0,15 ÷ -0,15
Связь 9–1		Связь 8–4	
Полное управление и коорд.	0,0000005 ÷ -0,0000005	Полное управление и коорд.	0,01 ÷ -0,06
С выборочной координацией	0,0000006 ÷ -0,0000006	С выборочной координацией	0,01 ÷ -0,06
Связь 7–1		Связь 8–2	
С полн. упр. и коорд.	0,0000005 ÷ -0,0000005	С полн. упр. и коорд.	0,002 ÷ -0,002
С выборочной координацией	0,0000006 ÷ -0,0000006	С выборочной координацией	0,0025 ÷ -0,0023

Например, при подаче возбуждения на первый узел на седьмом (невозбуждаемом) узле возникает реакция. Подключение нейроблока примерно вдвое сокращает время, необходимое для компенсации этой реакции, и снижает установившуюся погрешность, т. е. уменьшается возбуждение узла.

При моделировании структурных возмущений, как и при внешнем воздействии, подключение нейроблока выявило возбуждение не только на узле, на который подается структурное возмущение, но и на других узлах сети. Выборочная координация (в соответствии с информацией поискового блока о возбужденных узлах сети) позволяет несколько расширить диапазоны устойчивости моделируемой системы, что в реальной системе приведет к существенной экономии ресурсов, так как координирующие воздействия нужно подавать не на все узлы сети.

Результаты эксперимента приведены в табл. 4. Как было указано выше, «сильными» называются связи, возмущение которых значительно изменяет реакцию системы. «Связь 3–1», например, означает, что обратная связь замыкается с выхода третьего узла на вход первого.

На рис. 4–6 приведены графики реакции моделируемой системы при возбуждении ее узлов без координации, при подключении блоков координации и управления и при подключении нейросетевого блока. Из анализа графиков следует, что подключение нейроблока примерно вдвое сокращает время компенсации воздействия и снижает значение установившейся погрешности как на возбуждаемых узлах, так и на невозбуждаемых узлах и для всей системы в целом.

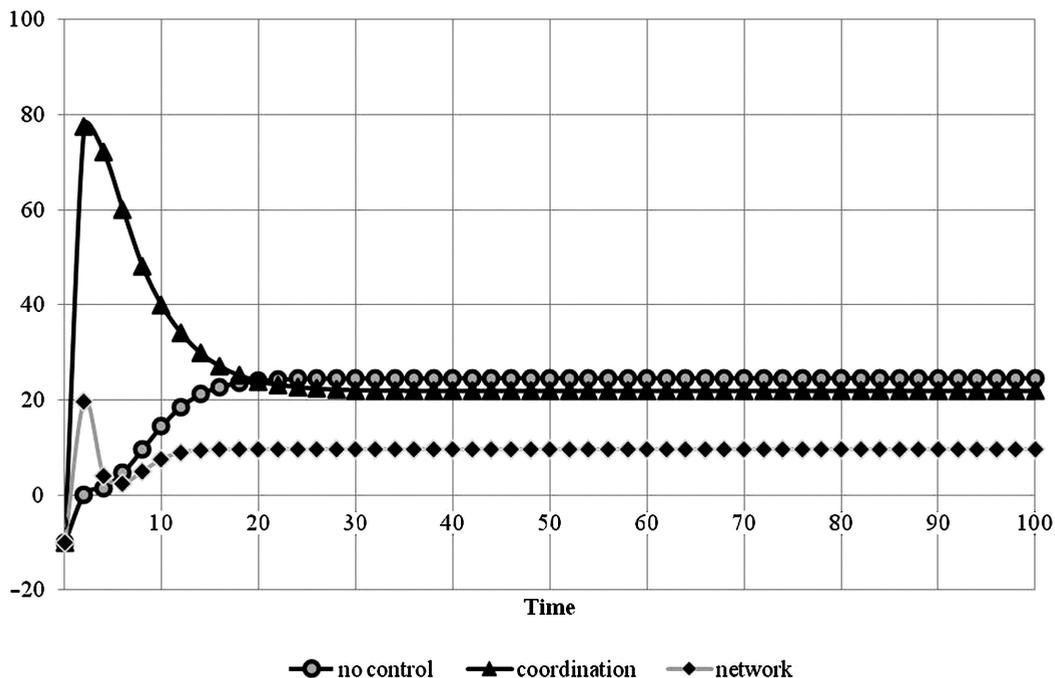


Рис. 4. Установившаяся погрешность при возбуждении на первом узле, связь 9–1, реакция на возбужденном узле:
 а) без координации (установившаяся погрешность — 24,6 %);
 б) с полной координацией (установившаяся погрешность — 21,9 %);
 в) с полной координацией и нейросетевым блоком (установившаяся погрешность — 9,6 %)

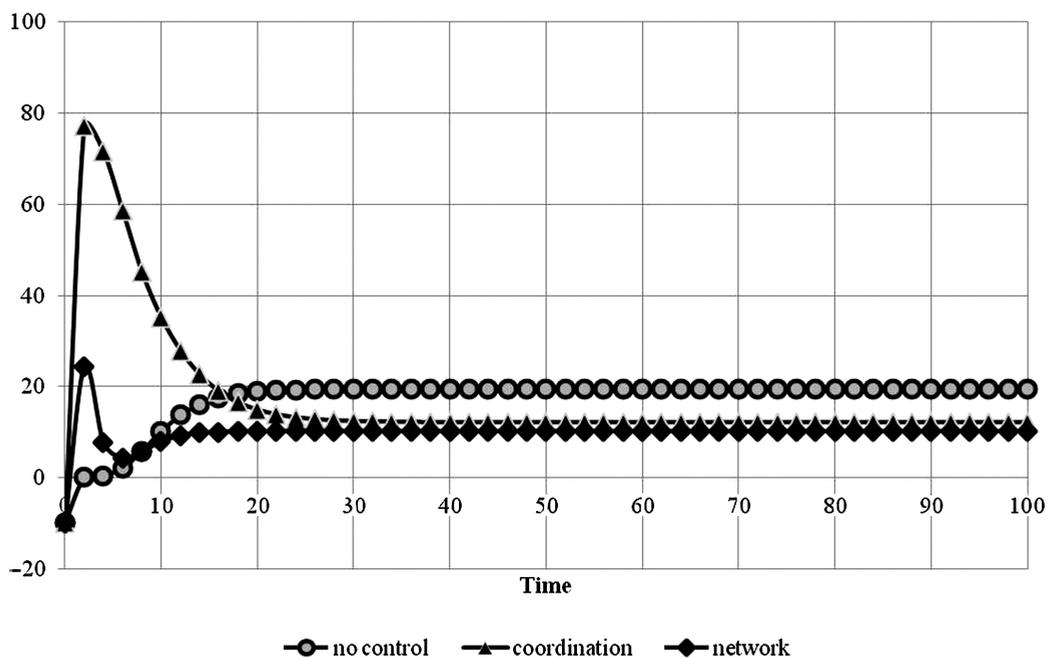


Рис. 5. Установившаяся погрешность при возбуждении на первом узле, реакция на невозбужденном третьем узле:
 а) без координации (установившаяся погрешность — 19,51 %);
 б) с полной координацией (установившаяся погрешность — 12,13 %);
 в) с полной координацией и нейросетевым блоком (установившаяся погрешность — 10,2 %)

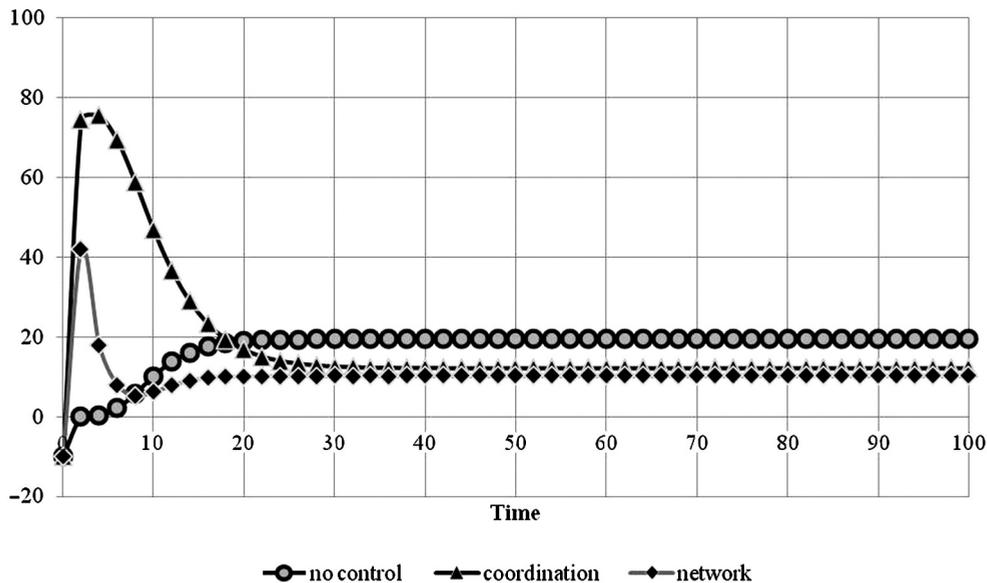


Рис. 6. Установившаяся погрешность при возбуждении на первом узле, реакция системы:
 а) без координации (установившаяся погрешность — 19,51 %);
 б) с полной координацией (установившаяся погрешность — 12,13 %);
 в) с полной координацией и нейросетевым блоком (установившаяся погрешность — 9,57 %)

Выводы

- Использование предложенного градиентного метода координации для исследованных объектов управления позволяет:
 - повысить устойчивость системы к внешним возмущениям и свести к минимуму взаимное влияние узлов сети, если локальные управляющие элементы не искажают намеренно информацию, передаваемую на уровень координатора,
 - расширить диапазон устойчивости системы к структурным возмущениям более чем в два раза.
- Проведены исследования по определению возбужденных узлов моделируемой системы. Нейроблок успешно определяет номера узлов, на которые подается одиночное внешнее возмущение в диапазоне возмущений 3–100 % от тестового возмущения (на котором обучалась сеть) в диапазоне времен моделирования 10–100 %.
- Подключение нейроблока приводит к уменьшению установившейся погрешности по сравнению с полной координацией при подаче внешнего возмущения как на одиночный узел, так и на несколько узлов.
- При подаче внешнего возмущения на несколько узлов нейроблок выявил реакцию на возмущение не только на возмущаемых узлах, но и на связанных с ними.

- Для невозбуждаемых узлов при подключении нейроблока время компенсации воздействия примерно вдвое сокращается, а возбуждение уменьшается.
- При моделировании структурных возмущений, так же, как и при внешнем воздействии, подключение нейроблока выявило возбуждение не только на узле, на который подается структурное возмущение, но и на других узлах сети. Выборочная координация (в соответствии с информацией поискового блока о возбужденных узлах сети) позволяет расширить диапазоны устойчивости моделируемой системы, сократить время компенсации воздействия в два раза, снизить значение установившейся погрешности.
- Эффективность работы нейроблока с ростом числа возмущаемых узлов падает, как с точки зрения уменьшения установившейся погрешности, так и времени компенсации для возбуждаемых узлов.

В целом можно утверждать, что моделирование предложенного градиентного метода подтвердило его эффективность для повышения устойчивости функционирования объектов с сетевой структурой в меняющейся окружающей среде. Новизна метода состоит в реализации способа прогнозирования взаимодействий без необходимости передачи координатору детальной информации о характеристиках локальных

подсистем, как требовалось в работах М. Месаровича [10], а лишь по значениям градиентов локальных критериев качества подсистем. Вопросы оптимизации быстродействия всей системы в рамках предложенного метода требуют дополнительных исследований, которые авторы планируют провести в будущем. Также необходимо оценить результативность предложенного метода в реальных приложениях.

Литература

1. Дьяконов В. П. VisSim+Mathcad+MATLAB. Визуальное математическое моделирование. М.: СОЛОН-Пресс, 2004. 384 с. (Серия «Полное руководство пользователя».)
2. Месарович, М., Мако Д., Такахага, И. Теория иерархических многоуровневых систем. М.: Мир, 1973. 344 с.
3. Салуквадзе М. Е. Задачи векторной оптимизации в теории управления. Тбилиси: Мецниереба, 1975. 202 с.
4. Стефанюк В. Л. Локальная организация интеллектуальных систем. М.: Физматлит, 2004. 328 с.
5. Фридман А. Я. Условия координируемости двухуровневого коллектива динамических интеллектуальных систем // Одиннадцатая национальная конф. по искусственному интеллекту с международным участием КИИ-2008 (28 сентября – 3 октября 2008 г., Дубна, Россия): Труды конференции. Т. 1. М.: ЛЕНАНД, 2008. С. 25–31.
6. Фридман А. Я. Ситуационное моделирование природно-технических комплексов / А. Я. Фридман, О. В. Фридман, А. А. Зуенко. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2010. 436 с.
7. Фридман А. Я. Градиентный метод координации управлений иерархическими и сетевыми структурами / А. Я. Фридман, О. В. Фридман // Информационно-управляющие системы. № 6. 2010. С. 13–20.
8. Фридман А. Я. Ситуационное моделирование иерархической многоцелевой системы / А. Я. Фридман, О. В. Фридман // Труды Всероссийской конференции «XXXV Дальневосточная Математическая школа-семинар имени академика Е. В. Золотова» (Владивосток, 31 августа – 5 сентября 2010 г.). С. 892–898.
9. Фридман А. Я. Устойчивость и чувствительность решений задачи координации иерархической многоцелевой системы / А. Я. Фридман, О. В. Фридман // VIII Всероссийская школа-семинар «Прикладные проблемы управления макросистемами», 29 марта – 2 апреля 2010 г., г. Апатиты / Труды Института системного анализа РАН / Под ред. Попкова Ю. С., Путилова В. А. М: Книжный дом «ЛИБРОКОМ», 2010. Т. 59. С. 240–252.
10. Фридман А. Я. Координация иерархических организационных систем: игровой и градиентный подходы / А. Я. Фридман, О. В. Фридман, В. А. Зеленцов // Проблемы теории и практики управления. № 6. 2011. С. 14–22.

Фридман Ольга Владимировна. С. н. с. ИИММ КНЦ РАН. К. т. н. Окончила в 1984 г. Петрозаводский ГУ им. О. В. Куусинена. Кол-во печатных работ: более 130, из них, 1 монография и 13 учебных пособий. Область научных интересов: прикладные интеллектуализированные системы, экспертные системы, нейронные сети. E-mail: ofridman@iimm.kolasc.net.ru

Фридман Александр Яковлевич. Вед. н. с. ИИММ КНЦ РАН. Д. т. н., профессор. Окончил в 1975 г. Ленинградский электротехнический институт им. В. И. Ульянова. Кол-во печатных работ: более 230, из них 16 изобретений, 4 монографии и 22 учебных пособия. Область научных интересов: моделирование комплексных технологий и их воздействия на окружающую среду, прикладные интеллектуализированные системы. E-mail: fridman@iimm.kolasc.net.ru