

**ИМИТАЦИОННЫЙ ПОДХОД К МОДЕЛИРОВАНИЮ КООРДИНАЦИИ
СЛОЖНЫХ ДИНАМИЧЕСКИХ СИСТЕМ*****А. Я. Фридман, О. В. Фридман (Апатиты)**

Основным преимуществом имитационных моделей по сравнению с аналитическими является возможность решения более сложных задач. Имитационные модели учитывают наличие дискретных или непрерывных элементов, нелинейные характеристики, случайные воздействия и др. Поэтому имитационное моделирование широко применяется на этапе проектирования сложных систем.

Имитационные модели не только по свойствам, но и по структуре соответствуют моделируемому объекту, поскольку имеется однозначное и явное соответствие между процессами, получаемыми на модели, и процессами, протекающими на объекте.

Имитационное моделирование позволяет имитировать поведение системы во времени, имеется возможность управлять временем в модели: замедлять в случае быстропротекающих процессов и ускорять для моделирования систем с медленной изменчивостью. Кроме того, имеются средства для имитации поведения объектов, реальные эксперименты с которыми дороги, невозможны или опасны.

При моделировании сложных динамических систем не удается учесть достаточно большого числа реальных факторов, поскольку это чрезмерно усложняет модель. Поэтому в модель приходится вводить лишь ограниченное число таких факторов, которые по тем или иным соображениям считаются наиболее существенными.

Возможны два подхода: не учтенные в описании модели факторы считают несущественными и полностью игнорируют при принятии решений с использованием этой модели, или не вводят явно "несущественные факторы" в модель, но учитывают их влияние, допустив, что отклик модели на то или иное воздействие известен лишь приближенно или нечетко.

В работе [1] представлена реализация второго подхода путем исследования чувствительности результатов многокритериальной оптимизации поведения объекта моделирования к изменениям исходных данных и внутренних характеристик системы.

С помощью системы визуального блочного математического моделирования VisSim [2] на примере двухуровневой системы управления линейным объектом проанализированы предложенные в работах [3, 4] необходимые и достаточные условия координируемости локально организованной иерархии динамических систем. Цель анализа состояла в выявлении диапазонов устойчивости локальных управлений и координирующих сигналов к небольшим изменениям динамических характеристик объекта управления (вариациям, в том числе структурным) и уровней задающих воздействий. Кроме того, оценивались возможности повышения быстродействия иерархической системы.

Исследования проводились для 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, состоящая из трех управляющих элементов нижнего уровня, каждый из которых вырабатывал сигнал управления "подведомственным" ему звеном управляемой системы, и одного координирующего элемента верхнего уровня.

В качестве элементов второго уровня используются три аналогичных друг другу локальных управляющих элемента. В каждом из них вычисляется градиент обобщенно-

* Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 09-07-00066), Отделения нанотехнологий и информационных технологий РАН (проект 2.3 в рамках текущей Программы фундаментальных научных исследований) и Президиума РАН (проект 4.3 Программы № 15).

го критерия [3, 4], его значения подаются в качестве управляющего воздействия на входы блоков управляемой системы.

Управляющие элементы нижнего уровня использовали для принятия решений (выработки управляющих воздействий) только 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 [5]. Для принятия решений все управляющие элементы использовали представленный в [6] обобщенный критерий затрат. Результаты моделирования показали, что при пошаговом изменении управляющих воздействий на отдельные линейные звенья с использованием в качестве "стабилизирующего" значения обобщенного критерия затрат, вычисляемого для каждой подсистемы на каждом шаге моделирования, диапазон устойчивости системы в целом расширяется. Таким образом экспериментально подтверждены выводы, сделанные в работе [4], об устойчивости результатов децентрализованного управления на основе градиентов (приращений) локальных критериев качества.

Для исследованной двухуровневой системы управления линейным объектом подключение нижнего уровня управления в среднем на порядок расширяет диапазоны устойчивости системы к внешним возмущениям и примерно вдвое уменьшает процент расхождения идеальной и реальной траекторий системы.

Подключение блока координации позволяет повысить устойчивость системы к внешним возмущениям более чем вдвое, увеличить быстродействие системы приблизительно вдвое, расширить диапазон устойчивости системы к структурным возмущениям в полтора – два раза (по сравнению с локальным управлением).

В работах [1, 3, 4, 6–9] по методике, описанной для иерархической управляемой системы [1], проведено моделирование поведения децентрализованной системы управления сетью объектов (рис. 1).



Рис. 1. Упрощенная схема децентрализованной системы управления сетью объектов

Проанализирована устойчивость моделируемой системы к внешним возмущениям. Для этого на каждый узел сети поочередно подавался сигнал, соответствующий 10%-ному внешнему возмущению.

Далее определялись 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). Диапазон устойчивости определялся по той же методике, что и для иерархической системы (отклонение по амплитуде $\pm 5\%$). Проанализированы все возможные сочетания связей "вход–выход".

Затем выявлялись диапазоны устойчивости системы при поочередном подключении управления на каждый узел сети. Управления задавались пропорционально градиенту обобщенного критерия [3, 4], его значения вводились 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.

Следующий шаг эксперимента – подключение координатора по той же схеме, как в иерархической системе. Блок координации подключался только на возбуждаемый узел и на все узлы сети с одиночным подключением управления (на возбуждаемый узел сети) и полным подключением управления (на все узлы сети).

Для двухуровневой системы управления сетевым объектом выявлено разделение внутренних обратных связей на "сильные" (возмущение, подаваемое на эти связи, существенно влияет на поведение системы в целом) и "слабые". Поочередное подключение локальных управлений в среднем на порядок расширяет диапазоны устойчивости соответствующих "сильных" связей к внешним возмущениям и практически не влияет на "слабые" связи. Локальное одиночное управление тем узлом сети, на который подано возмущение, достаточно эффективно компенсирует небольшие структурные возмущения и более чем вдвое уменьшает процент расхождения идеальной и реальной траекторий системы в целом. Полное подключение нижнего уровня управления ведет к резкому сужению диапазонов устойчивости "сильных" связей (в 2–4 раза) и появлению реакции на невозбуждаемых узлах сети. Следовательно, некоординируемые локальные управления "мешают" друг другу, что и можно было предположить с учетом особенностей сетевых структур.

Полное подключение управления и координации (на все узлы сети) для "слабых" связей практически ничего не изменило с точки зрения величины диапазона устойчивости. Для "сильных" связей диапазон устойчивости расширился, в целом реакция системы на возмущение стала слабее. Таким образом, полное подключение управления и координации дает наилучший эффект при компенсации малых структурных возмущений.

Градиентные методы сравнительно просты в реализации, но в общем случае применимы только к системам, где неопределенность порождается случайными событиями и процессами (иногда для их описания применяют термин "игры с природой"). Проблема состоит в том, что в реальных системах сложно априорно определить, имеется ли сознательное противодействие сигналам координатора. На описанных выше этапах моделирования возмущение на отдельные узлы исследуемых систем подавалось «вручную», в каждый момент времени было известно, какой именно узел модели подвергается внешнему (или внутреннему, структурному) воздействию. В реальных системах эта информация отсутствует, поэтому следующим этапом моделирования стала разработка метода поиска «возмущенного» узла моделируемой системы.

Для решения этой задачи в качестве поискового блока предлагается использовать нейронную сеть [11]. В среде Matlab моделировались нейронные сети различной структуры: линейный слой, однонаправленная сеть, каскадная направленная сеть, перцептрон и самоорганизующаяся карта. Исследования показали, что наилучшее распознавание дает однонаправленная сеть. Структура сети предельно упрощена, сеть состо-

ит из двух слоев, в первом слое 9 нейронов, каждый из которых соответствует узлу моделируемой системы, во втором слое – 1 нейрон. На рис. 2 приведена упрощенная структура сети.

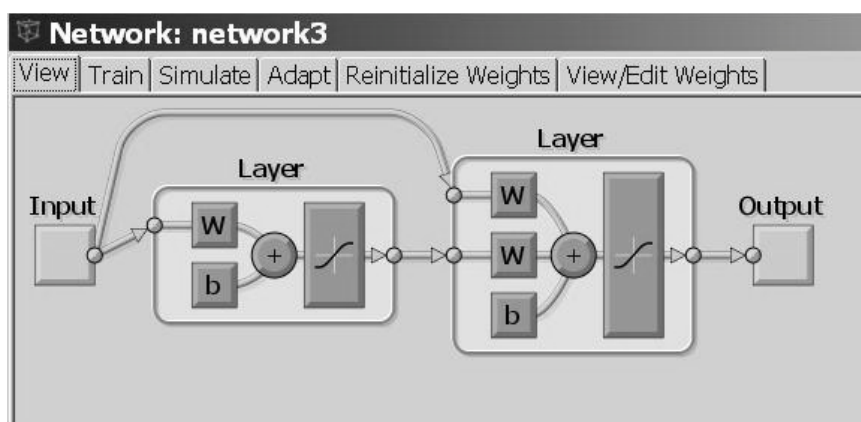


Рис. 2. Структура однонаправленной сети

Для обучения и тестирования сети использовались результаты предыдущих этапов «ручного» воздействия на систему. Обученная сеть должна определять «возмущенный» узел системы.

В настоящее время исследована распознавательная способность сети при подаче внешнего возмущения на каждый узел моделируемой системы. Как показали исследования, на внешнее возбуждение реагируют только «сильные» узлы системы. Обучение проводилось в условиях 10%-ного внешнего возмущения. После обучения сеть однозначно распознает узел, на который подано внешнее возмущение, как с большей амплитудой, так и с меньшей, чем в обучающей выборке. Кроме того, исследовались ситуации, когда возмущение разной амплитуды подавалось на несколько узлов моделируемой системы. Сеть определяет возмущенные узлы, но для оценки степени их возмущения требуется дообучение сети, что будет сделано в дальнейшем.

Кроме того, будут проведены работы по распознаванию узлов моделируемой системы при возникновении внутренних структурных возмущений, информация о локализации возмущения в системе будет передаваться на уровни управления и координации.

Следующим этапом работы является полное подключение управления и координации (на все узлы моделируемой системы) при использовании нейронной сети для получения информации о локализации возмущения в системе, что позволит координатору принять решение о воздействии на выявленный узел.

Прогнозируется, что использование нейронной сети в качестве поискового блока должно вести к повышению быстродействия децентрализованных систем управления сетевыми структурами.

Выводы

1. Использование предложенного градиентного метода координации для сетевого объекта 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, как и для двухуровневой системы управления линейным объектом.

2. Для поиска «возмущенного» узла моделируемой системы в качестве поискового блока использовалась однонаправленная сеть, которая показала хорошую распознавательную способность.

Литература

1. **Фридман А. Я., Фридман О. В.** Ситуационное моделирование иерархической многоцелевой системы // Труды Всероссийской конференции "XXXV Дальневосточная математическая школа-семинар имени академика Е.В. Золотова" (Владивосток, 31 августа–5 сентября 2010 г.). С. 892–898.
2. **Дьяконов В. П.** VisSim+Mathcad+MATLAB. Визуальное математическое моделирование. М.: СОЛОН-Пресс, 2004. 384 с. (Сер. Полное руководство пользователя).
3. **Фридман А. Я.** Достаточные условия координируемости локально организованной иерархии динамических систем / Искусственный интеллект. Интеллектуальные системы (ИИ-2009) // Материалы X Международной научно-технической конференции. Таганрог: Изд-во ТТИ ЮФУ, 2009. С. 115–117.
4. **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.
5. **Месарович М., Мако Д., Такахара И.** Теория иерархических многоуровневых систем. М.: Мир, 1973. 344 с.
6. **Фридман А. Я.** Ситуационный подход к моделированию промышленно-природных комплексов и управлению их структурой. // Труды IV международной конференции "Идентификация систем и задачи управления". М.: Ин-т проблем управления им. В.А. Трапезникова, 2005. С. 1075–1108.
7. **Фридман А. Я., Фридман О. В.** Градиентный метод координации управлений иерархическими и сетевыми структурами // Информационно-управляющие системы 2010. № 6. С. 13–20.
8. **Fridman Alexander, Fridman Olga.** Gradient Coordination Technique for Controlling Hierarchical and Network Systems // Systems Research Forum. 2010. Vol. 4. № 2. P. 121–136.
9. **Fridman Alexander, Fridman Olga.** Incremental Coordination in Collaborative Networks // Proceedings of International Congress on Ultra Modern Telecommunications and Control Systems (ICUMT-2010), October 18–20, 2010, Moscow, Russia [Электронный ресурс] (CD-ROM). Paper № 1569337294.
10. **Козюкова Т. И.** Координируемость многокритериальных взаимосвязанных задач линейного программирования // Методы принятия решений в условиях неопределенности. Рига, 1980. С. 99–107.
11. **Городецкий А. Е., Тарасова И.Л.** Управление и нейронные сети. СПб.: Изд-во Политехнического университета, 2005. 312 с.