МУЛЬТИАГЕНТНАЯ ИМИТАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ РЕГИОНАЛЬНОГО СТРОИТЕЛЬНОГО КЛАСТЕРА КАК ГЕТЕРАРХИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ

Д.П. Ануфриев, А.Ю. Холодов

*Астраханский государственный архитектурно-строительный университет (АГАСУ),
414056, г. Астрахань, ул. Татищева, д. 18*

Предмет исследования: региональный строительный кластер, который рассматривается как сложная система, территориально локализованная в пределах региона, состоящая из взаимосвязанных и взаимодополняемых предприятий строительной и смежных отраслей, объединенных гетерархическими связями с местными учреждениями, органами власти, сотрудничающими предприятиями.

Цели: разработка мультиагентной имитационной модели, позволяющей исследовать бизнес-процессы в региональном строительном кластере как сложной гетерархической системе.

Материалы и методы: сформулирована постановка математической задачи описания процессов в гетерархической системе как в особой мультиагентной сети массового обслуживания.

Результаты: в статье обосновано применение децентрализованного подхода, основанного на использовании агентной методологии. Разработано несколько типов агентов, моделирующих элементарные организационные структуры.

Выводы: Дано описание функционального ядра мультиагентной имитационной модели, описывающей гетерархическую организационную. С использованием критерия Фишмана–Кивиа установлена адекватность логического функционирования разработанной модели.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: имитационное моделирование, мультиагентные модели, сети массового обслуживания, дискретно-событийный подход, агентный подход

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Ануфриев Д.П., Холодов А.Ю. Мультиагентная имитационная модель регионального строительного кластера как гетерархической системы // Вестник МГСУ. 2017. Т. 12. Вып. 12 (111). С. 1415–1423.

MULTIAGENT IMITATION MODEL OF A REGIONAL CONSTRUCTION CLUSTER AS A HETERARCHICAL SYSTEM

Anufriev D.P., Holodov A.Yu.

*Astrakhan State University of Architecture and Civil Engineering (ASUACE),
18 Tatishcheva st., Astrakhan, 414056, Russian Federation*

Subject: a regional construction cluster, which is viewed as a complex system territorially localized within the region, consisting of interconnected and complementary enterprises of construction and related industries that are united with local institutions, authorities and cooperating enterprises by heterarchic relations.

Research objectives: development of multi-agent simulation model that allows us to examine the business-processes in the regional construction cluster as a complex heterarchical system.

Materials and methods: we formulate the mathematical problem for description of processes in a heterarchic system as in a special multi-agent queueing network.

Conclusions: the article substantiates application of the decentralized approach which is based on the use of agent methodology. Several types of agents that model elementary organizational structures have been developed. We describe the functional core of the multi-agent simulation model characterizing the heterarchic organizational model. Using the Fishman-Kivia criterion, the adequacy of the logical functioning of the developed model was established.

KEY WORDS: imitation modeling, multi-agent models, queueing networks, discrete-event approach, agent approach

FOR CITATION: Anufriev D.P., Kholodov A.Yu. Mul'tiagentnaya imitatsionnaya model' regional'nogo stroitel'nogo klastera kak geterarkhicheskoy sistemy [Multi-agent imitation model of the regional construction cluster as a heterarchical system]. Vestnik MGSU [Proceedings of the Moscow State University of Civil Engineering]. 2017, vol. 12, issue 12 (111), pp. 1415–1423.

ВВЕДЕНИЕ

Очень часто возникают задачи, связанные с моделированием бизнес-процессов, включающих в себя выполнение различных технологических процессов, имеющих, вообще говоря, сложную топологическую структуру (дисциплину) — в качестве простейших можно указать последовательные и параллельные структуры. Естественно, что само моделирование осуществляется с целью получения полного и частичного описания бизнес-процесса с последующей возможностью его изменения для достижения экстремальных (минимальных/максимальных) значений некоторых его параметров. При этом необходимо отметить, что элементы (структуры), выполняющие технологические процессы, не находятся в ожидании их включения в бизнес-процесс, а «живут своей жизнью», т.е. их готовность носит ярко выраженную вероятностную структуру.

ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ

Рассмотрим систему регионального строительства [1], она включает в себя различные субъекты: инвесторов (девелоперов), застройщиков, подрядчиков, организации изыскателей и проектировщиков, а также органы государственной власти и местного самоуправления. Все перечисленные структуры (элементарные (атомарные) структуры) выполняют разные функции, необходимые для возведения с нуля и сдачи в эксплуатацию строительных объектов и образуют самодостаточную и сбалансированную систему. Причем, за исключением органов власти и местного самоуправления, структуры занимают свои экономические ниши, формируют и обеспечивают собственные портфели заказов (возможно, даже не связанные со строительством). Теперь предположим, что при принятии неких программ федерального или регионального уровня (например, программы переселения из ветхого и аварийного жилья) возникает необходимость в возведении строительных объектов [2, 3]. Естественно, под данную программу начинают создаваться объединения из вышеперечисленных структур, готовые функционально выполнить сформированную задачу. После выполнения задач, связанных с введенной программой, объединения структур разрушаются и система переходит в свое начальное состояние. Причем сразу же необходимо отметить возможность отсутствия поступательного характера процесса относительно интервалов вхождения в него элементарных структур. И тут возникают вопросы:

1. Может ли система справиться с поставленной задачей, не будет ли задержек с ее выполнением, а если будут, то как их определить?

2. Как правильно формировать портфель заказов: вести старую политику или отказывать текущим заказчикам и ориентироваться на новую задачу,

учитывая возможность возникновения временных задержек, зависящих от других структур?

3. Появляются ли новые места в экономических нишах тех или иных структур, необходимо ли их заполнять или организовать сотрудничество с другими регионами и т.п.?

Естественно, что ответы на эти вопросы может дать моделирование системы [4, 5]. Кроме того, анализ модели системы может позволить определить узкие места системы в целом и предоставить управленческие методики предотвращения их возникновения [6].

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В рассмотрение вводится открытая система, объединяющая в себе элементы различного типа. Причем количество типов является величиной определенной, а открытость системы понимается с позиций возможности изменения количества элементов в пределах выбранного типа. Элементы в системе могут находиться в двух состояниях: «свободен» и «занят». В систему могут поступать внешние требования для обслуживания с определенной дисциплиной прохождения системы, формирующие цепочки из последовательно-соединенных элементов различного типа. Причем дисциплина прохождения системы однозначно определяет структуру соединения и последовательность прохождения элементов. Если, согласно определенной дисциплине внешнего требования, все элементы выбранного типа находятся в состоянии «занят», требование переходит в режим «ожидание» до появления элемента в состоянии «свободен». Требование, полностью обеспеченное обслуживанием в системе, покидает систему, приводя к «разрушению» цепочки связей, установленной согласно ее дисциплине.

При данной постановке задачи вполне естественно возникает желание использовать сеть массового обслуживания с целью моделирования процесса (рис. 1), так как возникает устойчивая ассоциация, что типы можно представить узлами сети, элементы — последовательно соединенными обслуживающими устройствами в пределах узла, внешние требования будут определять входящий поток заявок, а процесс возникновения необходимости в ожидании требования можно реализовать с помощью введения в сеть очередей перед каждым узлом (рис. 2).

Во-первых, отметим сложность определенной СеМО с позиций получения функциональных зависимостей выходных параметров (временные интервалы выходящего потока, общее среднее время ожидания обслуживания, общее среднее время обслуживания в системе, а также подобные параметры по каждому узлу сети и соответствующей ей очереди) от входных параметров (параметров входящих потоков и обслуживающих устройств), так

Рис. 1. Схематичное представление сети массового обслуживания, разработанной согласно поставленной задаче, содержащей N параллельно соединенных узлов

Рис. 2. Схематичное представление узла СеМО, содержащего K параллельно соединенных обслуживающих устройств

как заявки имеют сложную дисциплину прохождения системы, и, кроме того, каждое обслуживающее устройство в узле сети имеет свой входящий поток требований, моделирующий смену физических со-

стояний элементарной структуры («занят», «свободен»). И совершенно очевидно, что ни о каких аналитических выводах функциональных зависимостей речь идти не может и единственная мето-

дика исследования такой СеМО и, соответственно, поставленной задачи, основана на разработке имитационной модели с последующим статистическим анализом имитационных экспериментов.

Во-вторых, моделирование поставленной задачи посредством СеМО приводит к тому, что мы накладываем на нашу систему следующие ограничения, а именно: переход к i -му узлу сети происходит после полного обслуживания в некоем предыдущем j -м узле (согласно дисциплине прохождения требования), т.е. моделируется только последовательное выполнение всех технологических процессов в системе, а наша постановка задачи должна предусматривать и другие возможности, а когда требование, поступив в систему, может обратиться к некоей элементарной структуре, которая будет сопровождать ее в течение всего жизненного цикла. В работах [7–12] рассматривались вопросы централизации и децентрализации при моделировании систем, основанные на выборе основного подхода при разработке модели. Централизации отвечает дискретно-событийный подход, а децентрализации — агентный (многоагентный, мультиагентный), причем возможна их гибридизация, но правило остается неизменным [13, 14]. Таким образом, согласно поставленной задаче, авторами был выбран базовый агентный метод для разработки имитационной модели сформулированной системы.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В предыдущем разделе был обоснован выбор базового метода для разработки имитационной

модели. Авторы определили агентный метод в качестве базового, и, поскольку входящие в моделируемую систему элементарные структуры имеют разные типы, определяющие их технологические процессы, при разработке имитационной модели использовался мультиагентный подход. Таким образом, была разработана имитационная модель, включающая в себя агентов трех различных типов, внешнее требование и окружающую агентов система. Перейдем к подробному рассмотрению перечисленных выше компонентов модели.

1. Агенты, моделирующие элементарные структуры различных типов. На рис. 3, 4, 5, представлены имитационные блок-схемы разработанных агентов (Agent_type_1, Agent_type_2, Agent_type_3).

Сначала рассмотрим общие элементы, определяющие функционирование агентов, а потом перейдем к их различиям.

Все агенты имеют элемент statechart, определяющий два физических состояния: Free (Свободен) и Work (Занят), причем при переходе из состояния в состояние, графическое представление агента изменяет цвет (Agent_type_1 — белый/синий, Agent_type_2 — белый/красный, Agent_type_3 — белый/красный), эти функции реализованы с целью облегчения процессов отладки и тестирования модели.

Все агенты имеют переменные ParamX и ParamY, необходимые для хранения данных (координат) о местоположении агента в графической области соответствующего типа.

Все агенты имеют переменные Status и Level, необходимые для идентификации или выполнения

Рис. 3. Имитационная блок-схема агента Agent_type_1

Рис. 4. Имитационная блок-схема агента Agent_type_2

Рис. 5. Имитационная блок-схема агента Agent_type_3

внутреннего текущего заказа или участия в цепочке структур, организованной внешним требованием. У всех агентов имеется переменная Order, посредством которой осуществляется мультиагентная связь с имитационной структурой Order, моделирующей внешнее требование, которая также является агентом. Также присутствует элемент-событие event, участвующее в моделировании процесса поступления внутренних заказов в структуры, обеспечивая изменения физических состояний.

Теперь перейдем к различиям, обеспечивающим мультиагентность разработанной имитационной модели. Причем необходимо отметить, что

представляемая модель носит чисто академический характер, поэтому авторы внесли в каждый тип различные дискретно-событийные модули, указывающие на действительное различие моделируемых технологических процессов. Таким образом, в блок-схеме Agent_type_1 моделируется процесс с помощью одноканальной системы массового обслуживания с очередью, в блок-схеме Agent_type_2 — с помощью двухфазной системы массового обслуживания с очередью, а в блок-схеме Agent_type_3 — с помощью двухканальной системы массового обслуживания с очередью.

Рис. 6. Имитационная блок-схема агента Order

2. Агент, моделирующий внешнее требование и поддержку соблюдения дисциплины прохождения системы. На рис. 6 представлена имитационная блок-схема разработанного агента (Order).

На представленной блок-схеме переменные Index и Line определяют графическое положение цепочек из агентов на презентации модели посредством значений индексов в динамических структурах, определенных в модуле Main. В этом же процессе участвуют и три функции (Function_A, Function_B и Function_C).

Три переменные AT_1, AT_2 и AT_3 участвуют в организации мультиагентных связей с агентами разного типа. Основной же структурой данного агента является statechart, описывающий возможные физические состояния внешнего требования и переходы между ними. Почти все переходы осуществля-

ются посредством передачи сообщения от агентов различного типа, демонстрирующих либо их готовность принять требование на обслуживание, либо окончание обслуживания и необходимости поиска свободных агентов другого типа, согласующихся с дисциплиной прохождения требования в системе.

Теперь остановимся на моментах, связанных с адекватностью разработанной модели поставленной задачи, сформулированной в соответствующем разделе, а также масштабируемости имитационной программы.

В работе Р. Шеннона [4] обосновано применение критерия Кивиа—Фишмана для установления адекватности разработанных имитационных моделей [15, 16]. Согласно этому критерию, во-первых, была установлена тождественность логического функционирования модели и поставленной задачи.

Данная цель была достигнута посредством визуального представления процесса выполнения модели и режимов пошагового выполнения программы. Во-вторых, были подготовлены тестовые входные параметры, обеспечивающие прохождение внешних требований без задержек. Это было реализовано посредством замены полей иницирующих генерацию значений случайных величин на тестовые константы. Результаты имитационных экспериментов полностью согласовываются с расчетными значениями выходных параметров.

Поскольку в качестве базового подхода для разработки имитационной модели был выбран агентный подход, основанный на системе физических состояний, то масштабируемость программы достигается добавлением новых состояний и установкой переходов к ним, при этом совсем не изменяется структура программы, отчасти это обусловлено использованием парадигм объектно-ориентированного программирования [17–22].

ВЫВОДЫ

Показано, что региональный строительный кластер достаточно раздроблен, не управляется из единого центра, состоит из множества самостоятельных хозяйствующих субъектов, обладающих специфическими особенностями, т.е. его можно рассматривать как сложную социально-экономическую систему с гетерархическими связями с местными учреждениями, органами власти, сотрудничающими предприятиями.

Представлено функциональное ядро мультиагентной имитационной модели, позволяющей описывать гетерархические системы, имеющие сложную топологию. Обоснован выбор агентного подхода в моделировании процессов. Была установлена адекватность модели сформулированной логикой функционирования поставленной задачи. Показано, что программа является масштабируемой, т.е. для ее изменения не требуется кардинальных изменений в структуре.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ануфриев Д.П. Жилище как элемент социально-экономической системы региона: опыт прикладного исследования // Вестник МГСУ. 2014. № 2. С. 187–195.
2. Ануфриев Д.П. Математическая модель регионального строительного комплекса // Астрахань — дом будущего : тез. II Междунар. науч.-практ. конф. Астрахань : Изд. Сорокин Роман Васильевич, 2010. С. 58–73.
3. Ануфриев Д.П. Региональный строительный кластер Астраханской области // Вестник МГСУ. 2017. Т. 12. № 1 (100). С. 99–106.
4. Шеннон Р. Имитационное моделирование систем — искусство и наука / пер. с англ. под ред. Е.К. Масловского. М. : Мир, 1978. 420 с.
5. Kuehn P. Approximate analysis of general queuing networks by Decomposition // IEEE Transactions on Communications. 1979. Vol. 27. No. 1. Pp. 113–126.
6. Henderson W. Queueing networks with negative customers and negative queueing length // Journal of Applied Probability. 1993. Vol. 30. Pp. 931–942.
7. Henderson W., Taylor P.G. Some new results on queueing networks with batch movement // Journal of Applied Probability. 1991. Vol. 28. Pp. 409–421.
8. Baskett F., Chandy K.M., Muntz R.R., Palacios F.G. Open, closed, and mixed networks of queues with different classes of customers // Journal of Association for Computing Machinery. 1975. Vol. 22. No. 2. Pp. 248–260.
9. Kaminsky F.C., Rumpf D.L. Simulating nonstationary poisson processes: a comparison of alternatives including the correct approach // Simulation. 1977. Vol. 29. Pp. 17–20.
10. Damerdj H., Nakayama M.K. Two-stage multiple comparison procedures for steady-state simulations // ACM Transactions on Modeling and Computer Simulation. Jan 1999. Vol. 9. No. 1. Pp. 1–30.
11. Schruben L.W. Simulation optimization using frequency domain methods // WSC '86 Proceedings of the 18th conference on Winter simulation. Pp. 366–369.
12. Yucsan E., Schruben L.W. Structural and Behavioral Equivalence of Simulation Models // Journal ACM Transactions on Modeling and Computer Simulation. 1992. Vol. 2. Issue 1. Pp. 82–103.
13. Venkatraman S., Wilson J.R. The efficiency of control variates in multiresponse simulation // Operations Research Letters. 1986. Vol. 5. Issue 1. Pp. 37–42.
14. Avramidis A.N., Wilson J.R. Integrated variance reduction strategies for simulation // Operations Research Letters. 1996. Vol. 44. Pp. 327–346.
15. Teleb R., Azadivar F. A methodology for solving multi-objective simulation-optimization problems // European Journal of Operational Research. 1994. Vol. 72. Pp. 135–145.
16. Restructuring networks: legacies, linkages, and localities in postsocialism / edited by G. Grabher and D. Stark. London and New York : Oxford University Press, 1997. Pp. 107–134.
17. Kelton W.D. Perspectives on Simulation Research and Practice // Journal on Computing. 1994. Vol. 6. Pp. 318–328.
18. Sargent R.G. Verifying and Validating Simulation Models // Proceedings of the 2011 Winter

Simulation Conference. December 7–10, 2014 Westin Savannah Harbor Resort Savannah, GA / S. Jain, R.R. Creasey, J. Himmelspach, K.P. White, Fu M. eds. 1996. Pp. 55–64.

19. *Donohue J.M.* Experimental designs for simulation // Proceedings of the 1994 Winter Simulation Conference, Orlando. 1994. Pp. 200–206.

20. *Brown R.* Calendar Queues: A fast O(1) priority queue implementation for the simulation event

set problem // Communications of the Associated Computing Mathematics. 1988. Vol. 31. Pp. 1220–1227.

21. *Smith R.L.* Efficient Monte-Carlo procedures for generating points uniformly distributed over bounded regions // Operations Research Letters. 1984. Vol. 32. Pp. 1296–1308.

Поступила в редакцию 8 сентября 2017 г.

Принята в доработанном виде 19 октября 2017 г.

Одобрена для публикации 20 ноября 2017 г.

ОБ АВТОРАХ: **Ануфриев Дмитрий Петрович** — кандидат технических наук, профессор, ректор, Астраханский государственный архитектурно-строительный университет (АГАСУ), 414056, г. Астрахань, ул. Татищева, д. 18, adp_2000@mail.ru;

Холодов Артем Юрьевич — кандидат технических наук, старший научный сотрудник лаборатории имитационного моделирования, Астраханский государственный архитектурно-строительный университет (АГАСУ), 414056, г. Астрахань, ул. Татищева, д. 18, artemhol@rambler.ru.

REFERENCES

1. Anufriev D.P. Zhilishche kak element sotsial'no-ekonomicheskoy sistemy regiona: opyt prikladnogo issledovaniya [Housing as an element of regional social and economic system: the experience of applied research]. *Vestnik MGSU* [Proceedings of the Moscow State University of Civil Engineering]. 2014, no. 2, pp. 187–195. (In Russian)

2. Anufriev D.P. Matematicheskaya model' regional'nogo stroitel'nogo kompleksa [Mathematical model of a regional building complex]. *Astrakhan' — dom budushchego : tezisy II Mezhdunar. nauch.-prakt. konf.* [Astrakhan as the house of the future: abstracts of the II International scientific and practical conference]. Astrakhan, Publisher Sorokin Roman Vasil'evich, 2010, pp. 58–73. (In Russian)

3. Anufriev D.P. Regional'nyy stroitel'nyy klaster Astrakhanskoy oblasti [Regional construction cluster of the Astrakhan region]. *Vestnik MGSU* [Proceedings of the Moscow State University of Civil Engineering]. 2017, vol. 12, no. 1 (100), pp. 99–106. (In Russian)

4. Shannon R.E. *Systems simulation: The art and science*. Prentice Hall, 1975.

5. Kuehn P. Approximate analysis of general queuing networks by decomposition. *IEEE Transactions on Communications*. 1979, vol. 27, no. 1, pp. 113–126.

6. Henderson W. Queueing networks with negative customers and negative queueing length. *Journal of Applied Probability*. 1993, vol. 30, pp. 931–942.

7. Henderson W., Taylor P.G. Some new results on queueing networks with batch movement. *Journal of Applied Probability*. 1991, vol. 28, pp. 409–421.

8. Baskett F., Chandy K.M., Muntz R.R., Palacios F.G. Open, closed, and mixed networks of queues with different classes of customers. *Journal of Association for Computing Machinery*. 1975, vol. 22, no. 2, pp. 248–260.

9. Kaminsky F.C., Rumpf D.L. Simulating nonstationary Poisson processes: a comparison of alternatives including the correct approach. *Simulation*. 1977, vol. 29, pp. 17–20.

10. Damerdj H., Nakayama M.K. Two-stage multiple comparison procedures for steady-state simulations. *ACM Transactions on Modeling and Computer Simulation*. Jan 1999, vol. 9, no. 1, pp. 1–30.

11. Schruben, L.W. Simulation optimization using frequency domain methods. *WSC '86 Proceedings of the 18th conference on winter simulation*. Pp. 366–369.

12. Yucesan E., Schruben L.W. Structural and behavioral equivalence of simulation models. *Journal ACM Transactions on Modeling and Computer Simulation*. 1992, vol. 2, issue 1, pp. 82–103.

13. Venkatraman S., Wilson J.R. The efficiency of control variates in multi-response simulation. *Operations Research Letters*. 1986, vol. 5, issue 1, pp. 37–42.

14. Avramidis A.N., Wilson J.R. Integrated variance reduction strategies for simulation. *Operations Research Letters*. 1996, vol. 44, pp. 327–346.

15. Teleb R., Azadivar F. A methodology for solving multi-objective simulation-optimization problems. *European Journal of Operational Research*. 1994, vol. 72, pp. 135–145.

16. *Restructuring networks: legacies, linkages, and localities in postsocialism* / edited by Gemot Grabher and David Stark. London and New York, Oxford University Press, 1997, pp. 107–134.

17. Kelton W.D. Perspectives on simulation research and practice. *Journal on Computing*. 1994, vol. 6, pp. 318–328.

18. Sargent R.G. Verifying and validating simulation models. *Proceedings of the 2011 Winter Simulation Conference. December 7–10, 2014 Westin Savannah Harbor Resort Savannah, GA*. 1996, pp. 55–64.

19. Donohue J.M. Experimental designs for simulation. *Proceedings of the 1994 Winter Simulation Conference, Orlando*. 1994, pp. 200–206.

20. Brown R. Calendar Queues: A fast $O(1)$ priority queue implementation for the simulation event set problem. *Communications of the Associated Computing Mathematics*. 1988, vol. 31, pp. 1220–1227.

21. Smith R.L. Efficient Monte-Carlo procedures for generating points uniformly distributed over bounded regions. *Operations Research Letters*. 1984, vol. 32, pp. 1296–1308.

Received September 8, 2017.

Adopted in final form on October 19, 2017.

Approved for publication on November 20, 2017.

ABOUT THE AUTHORS: **Anufriev Dmitriy Petrovich** — Candidate of Technical Sciences, Professor, Rector, **Astrakhan State University of Architecture and Civil Engineering (ASUACE)**, 18 Tatishcheva st., Astrakhan, 414056, Russian Federation; anufriev.dp@mail.ru;

Holodov Artem Yur'evich — Candidate of Technical Sciences, Senior Researcher of the Laboratory of Simulation Modeling, **Astrakhan State University of Architecture and Civil Engineering (ASUACE)**, 18 Tatishchev st., Astrakhan, 414056, Russian Federation, artemhol@rambler.ru.