

МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ СИСТЕМНОГО АНАЛИЗА И УПРАВЛЕНИЯ

УДК 330.46

РАЗРАБОТКА ПРИЛОЖЕНИЯ ДЛЯ ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ ПО УПРАВЛЕНИЮ ПРЕДПРИНИМАТЕЛЬСКОЙ СЕТЬЮ НА ОСНОВЕ СИСТЕМНО- ДИНАМИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ

Апанасенко А. В.*, Берг Д. Б.*

** Уральский федеральный университет, Екатеринбург, Россия*

Аннотация. В статье описана разработка приложения на основе имитационной системно-динамической модели. Проведен сравнительный анализ методов интеграции имитационных моделей с внешними системами. Наиболее оптимальным способом интеграции признан экспорт модели в виде программного кода. Этот код может быть встроен во внешние информационные системы или работать как самостоятельное приложение. Метод опробован на системно-динамической модели предпринимательской сети муниципалитета. В результате получено java-приложение для поддержки принятия решений по управлению предпринимательской сетью. Оно обладает всеми преимуществами модели, но лишено её главного недостатка – потребности в среде моделирования для запуска. Кроме того предложенное приложение имеет широкие перспективы развития и может в дальнейшем стать основой информационной системы. Такая система станет ещё более эффективным инструментом поддержки принятия управленческих решений.

Ключевые слова: предпринимательская сеть, имитационное моделирование, системная динамика, java-приложение, интеграция, поддержка принятия решений, управление, товарно-денежный обмен.

Поступила в редакцию 15.12.2020 г.

ВВЕДЕНИЕ

Имитационное моделирование – одна из наиболее эффективных и универсальных методологий изучения сложных систем. Имитационная модель повторяет функционирование изучаемой системы с некоторым упрощением. Такая модель реализуется на компьютере с помощью специального программного обеспечения. Она позволяет проводить над системой эксперименты, исключая материальные затраты и риски.

Частным случаем имитационного моделирования является системная динамика. Это метод, предложенный американским учёным Джейм Форрестером в 50-х гг. 20 в. [1]. Он основан на диаграммах причинно-следственных связей и дифференциально-разностных уравнениях, которые отражают взаимное влияние параметров модели во времени. Такой подход лучше других позволяет выявлять причинно-следственные связи между объектами и явлениями. Это особенно важно при изучении сложных экономических систем. Примером таких систем являются предпринимательские сети.

Предпринимательская сеть – это совокупность субъектов предпринимательства (сетевых партнёров). Сетевые партнёры объединяют свои усилия и реализуют свои интересы на основе критериев оптимальности функционирования. Одновременно эти критерии

связаны с удовлетворением социальных, экономических, производственно-технических и других внутренних и внешних интересов самой сетевой структуры [2].

Таким образом, имитационная системно-динамическая модель – эффективный инструмент поддержки принятия решений по управлению сетевым взаимодействием. Но с применением этого метода на практике возникают определённые сложности. Главной проблемой становится невозможность проведения имитационного эксперимента без специализированного программного обеспечения – среды имитационного моделирования. Это ограничивает перспективы применения данного метода, но ставит вопрос об интеграции моделей с внешними системами.

Многие ученые, изучающие имитационное моделирование, уделяют внимание этой теме. Так Маслобоев А.В., Олейник А.Г., Шишаев М.Г. предлагают информационную технологию дистанционного формирования и управления имитационными моделями. Такой подход позволяет использовать модели автономно, без среды моделирования [3]. Янкевский А.В., Кушеков К.К., Джимиева Р.Б. разработали систему имитационного динамического моделирования производственных процессов. Эта система обеспечивает связь имитационной модели с корпоративной информационной системой и хранилищем данных [4]. Акопов А.С. уделяет особое внимание интеграции имитационных моделей, созданных в различных средах моделирования, и обеспечению многопользовательского доступа [5]. Кроме того, этот вопрос затрагивают публикации на сайтах популярных систем имитационного моделирования [6, 7].

Целью данного исследования является разработка приложения для поддержки принятия решений по управлению предпринимательской сетью на основе системно-динамической модели, которое позволит снять ограничения среды моделирования при использовании разработанного инструмента на практике.

1. МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

1.1. Способы интеграции имитационной модели с внешней информационной системой

Существует несколько способов интегрировать имитационную модель с внешней информационной системой. Далее рассмотрены типы интеграции, доступные в двух крупнейших системах имитационного моделирования – Powersim и Anylogic.

1. Интеграция с табличным процессором MS Excel. Это простейший тип интеграции. Он доступен в среде моделирования Powersim и реализуется её встроенным инструментом (Speedsheet Dataset). Такая интеграция обеспечивает только первичную работу с данными – загрузку исходных данных и выгрузку результатов моделирования.

2. Интеграция с базами данных и информационными хранилищами. Способ интеграции, расширяющий возможности предыдущего метода. Он также реализуется средствами среды моделирования. В Powersim это Database Dataset. Такая интеграция позволяет подключить к модели базу или хранилище данных MS SQL Server, MS Access, Oracle и др. В Anylogic технология JDBC позволяет также писать SQL-запросы на прямую в переменных и функциях. Базы данных дают возможность работать с существенно большими объемами данных, чем Ms Excel.

3. Интеграция внешними системами в виде кода или создание автономных приложений. Этот тип интеграции обладает самым широким спектром возможностей. Он позволяет экспортировать модель в виде программного кода на одном из языков программирования. Далее полученный код может быть встроен в уже существующую информационную систему или выполняться как автономное приложение. В среде Powersim данный метод реализуется с помощью программного продукта Powersim SDK (Software Development Kit) и язык программирования можно выбрать. В Anylogic модель можно

экспортировать только в виде java-кода (инструмент «Экспорт модели»), но экспорт доступен в среде моделирования «из коробки».

4. Публикация модели в интернете. Это самый прогрессивный способ интеграции, стремительно набирающий популярность. Он частично пересекается с предыдущим, т.к. интеграция в виде кода позволяет встраивать модель в web-приложения. Кроме того, Anylogic позволяет создавать java-апплеты. Это приложения на языке программирования java, которые встраиваются в web-страницы и воспроизводятся прямо в браузере. Но сегодня они почти не используются, т.к. большинство браузеров отказалось от прямой поддержки java. Вместо этого крупнейшие системы имитационного моделирования открыли специальные облачные сервисы для публикации моделей. Для Powersim это партнёрские продукты MAS Consulting и forio. Для Anylogic – портал AnyLogic Cloud.

Каждый из перечисленных методов имеет свои особенности реализации, преимущества и недостатки. Их сравнительная характеристика приведена в таблице 1.

Анализ сильных и слабых сторон каждого их подходов показал, что наиболее широкими возможностями обладает метод разработки автономного java-приложения на основе имитационной модели Anylogic. Он реализует все возможности интеграции моделей с внешними системами:

- запуск модели вне среды моделирования;
- загрузка исходных данных из внешних источников;
- сохранение и анализ результатов моделирования;
- внешнее программное управление ходом имитационных экспериментов;
- двухсторонняя интеграция модели с внешними приложениями и ИС;
- неограниченные возможности в разработке пользовательского интерфейса.

Таблица 1

Сравнительная характеристика методов интеграции

	Реализация в Powersim	Реализация в Anylogic	Преимущества	Недостатки
Интеграция с табличным процессором MS Excel	встроенный инструмент Speedsheet Dataset	отсутствует	<ul style="list-style-type: none"> • просто реализовать; • не требуются знания программирования 	<ul style="list-style-type: none"> • обеспечивает только работу с данными; • ограниченный объём данных
Интеграция с базами данных и информационными хранилищами	встроенный инструмент Database Dataset	встроенная технология JDBC	<ul style="list-style-type: none"> • позволяет управлять имитацией; • позволяет работать с большими объёмами данных; • обеспечивает хранение многомерных данных 	<ul style="list-style-type: none"> • требует знания языков работы с БД (SQL); • может потребовать использование промежуточных моделей (SAP SEM BRS в Powersim)
Интеграция внешними системами в виде кода или создание автономных приложений	программный продукт Powersim SDK	встроенный инструмент «Экспорт модели» (только java-код)	<ul style="list-style-type: none"> • позволяет программно управлять имитационными экспериментами из внешнего приложения; • обеспечивает интеграцию с внешними ИС (MathLab); • позволяет разместить 	<ul style="list-style-type: none"> • требует знаний программирования; • требует установки дополнительного ПО (Powersim);

			<p>модель на сервере и обеспечить многопользовательский доступ;</p> <ul style="list-style-type: none"> • позволяет создать для модели разнообразный пользовательский интерфейс 	
<p>Публикация модели в интернете</p>	<p>партнёрские программные продукты MAS Consulting и forio</p>	<p>портал AnyLogic Cloud</p>	<ul style="list-style-type: none"> • обеспечивает распределенные вычисления; • обеспечивает многопользовательский доступ • позволяет запустить модель на любом компьютере в браузере 	<ul style="list-style-type: none"> • требует использования сторонних сервисов (Powersim); • имеет ограниченные возможности управления имитацией и работы с БД

Также стоит отметить ряд особенностей Anylogic в сравнении с другими средами моделирования. Они тоже могут выступать аргументами в пользу данного метода интеграции:

- создание гибридных моделей;
- широкие возможности доработки модели, благодаря встраиваемому java-коду;
- доступность всех функций «из коробки», без использования внешнего ПО;
- активно развивающееся пользовательское сообщество.

В результате интеграции может быть получена универсальная информационная система. Она будет иметь все преимущества имитационной модели как инструмента поддержки принятия решений, но при этом, не иметь её недостатков. В обобщенном виде структура такой системы представлена на рисунке 1:



Рисунок 1. Информационная система на основе имитационной модели

Начало реализации такой системы было положено в виде разработки приложения для поддержки принятия решений по управлению предпринимательской сетью на основе имитационной модели.

1.2. Имитационная системно-динамическая модель предпринимательской сети муниципалитета

Объектом данного исследования является предпринимательская сеть муниципалитета. Сеть составляют 5 сетевых партнёров. 4 из них – отраслевые объединения (растениеводство и животноводство, пищевая промышленность, услуги, население), а пятый – внешняя среда. Все связи между сетевыми партнёрами взаимно-направленные, т.е. каждый из участников сети покупает продукцию другого. Центральным узлом сети муниципалитета является сетевой партнёр «Население». Он имеет товарно-денежные отношения со всеми другими участниками сети. Внешнюю среду также можно считать участником сетевого взаимодействия. Система не является закрытой, и товарообмен происходит не только между участниками сети, но и представителями внешней среды.

Ранее для описанной сети уже была создана системно-динамическая модель в Powersim [8]. В рамках данного исследования аналогичная модель была реализована в AnyLogic. Эта среда моделирования обладает более широкими возможностями, как говорилось ранее. отражают взаимосвязь различных показателей функционирования предпринимательской сети муниципалитета, товарные и денежные потоки между ними:

1. Вектор взаимного обмена:

$$RE_{K(t)} = \{w_1^k, w_2^k, w_3^k, w_4^k, w_5^k\} \quad (1)$$

где w_n^k – элемент вектора взаимного обмена, советующий стоимости продукции n-го партнёра, которую потребил k-й партнёр, при n=k.

2. Количество товарных запасов сетевого партнёра:

$$GS_{K(t+1)} = GS_{K(t)} + GSA_{K(t)} - GSC_{K(t)} \quad (2),$$

$$\text{где } GSA_{K(t)} = \sum_{k=0}^n w_n^k$$

$$\text{и } GSC_{K(t)} = \sum_{k=0}^n w_k^n$$

где w_k^n – элемент вектора взаимного обмена, советующий стоимости продукции k-го партнёра, которую потребил n-й партнёр;

GSA_K – поступление товарных запасов k-му сетевому партнёру;

GSC_K – расход товарных запасов k-м сетевом партнёром.

3. Количество денег, доступных для обмена сетевому партнёру:

$$ME_{K(t+1)} = ME_{K(t)} + MAE_{K(t)} - MCE_{K(t)} \quad (3),$$

$$\text{где } MAE_{K(t)} = \sum_{k=0}^n w_k^n + IM_{K(t)},$$

$$\text{где } IM_{K(t)} = \begin{cases} \text{if } IMU = 1 \text{ и } ME_{K(t)} < 0 \\ \text{then } (-1 * ME_{K(t)}) + DPP_{K(t)} \\ \text{и } MCE_{K(t)} = \sum_{k=0}^n w_n^k \\ \text{else } 0 \end{cases},$$

$$\text{где } IM_{K(t)} = \begin{cases} \text{if } (MEA_{K(t-1)} - MCE_{K(t-1)}) < 0 \\ \text{then } (-1 * (MEA_{K(t-1)} - \\ - ME_{K(t-1)}) < 0) \\ \text{else } 0 \end{cases}$$

где MAE_K – поступление денег k-му сетевому партнёру;

MCE_K – расход денег k-м сетевым партнёром;

IM_K – использование внутренних денег k-м сетевом партнёром;

IMU – константа отражающая использование в системе внутренних денег (0 – не используются, 1 – используются).

4. Общее количество использованных внутренних денег:

$$IM(t+1) = IM(t) + IMA(t) \quad (4),$$

$$\text{где } IMA(t) = \sum_{k=0}^n IM_{K(t)}$$

где IMA – количество внутренних денег, введённых в финансовую систему финансовой сети для компенсации недостатка денежной массы.

5. Коэффициент обеспеченности товаров деньгами:

$$KS(t) = \frac{MF(t)}{MF(t) + GF(t)} \quad (5),$$

$$\text{где } MF(t) = \sum_{k=0}^n MAE_{K(t)} + MCE_{K(t)}$$

$$\text{и } GS(t) = \sum_{k=0}^n GSA_{K(t)} + GSC_{K(t)}$$

где MF – суммарный денежный поток внутри предпринимательской сети;
GF – суммарный товарный поток внутри предпринимательской сети.

6. Коэффициент кооперации:

$$KC(t) = \frac{GF(t)}{GF(t) + UGF(t)} \quad (6),$$

$$\text{где } UGF(t) = GF(t) + GSA_5(t) + GSC_5(t)$$

где UGF – суммарный двунаправленный товарный поток обмена с внешней средой

Кроме стандартной диаграммы причинно-следственных связей к модели был добавлен интерфейс ввода исходных данных. После этого, она была экспортирована как java-приложение с помощью встроенных инструментов AnyLogic. Таким образом было получено мультиплатформенное приложение для поддержки принятия решений по управлению предпринимательской сетью.

1.3. Приложение, разработанное на основе имитационной модели предпринимательской сети

Приложение включает 2 экранные формы. Первая предназначена для пользовательского ввода входных данных и настройки параметров модели. Её фрагмент представлен на рис. 2:

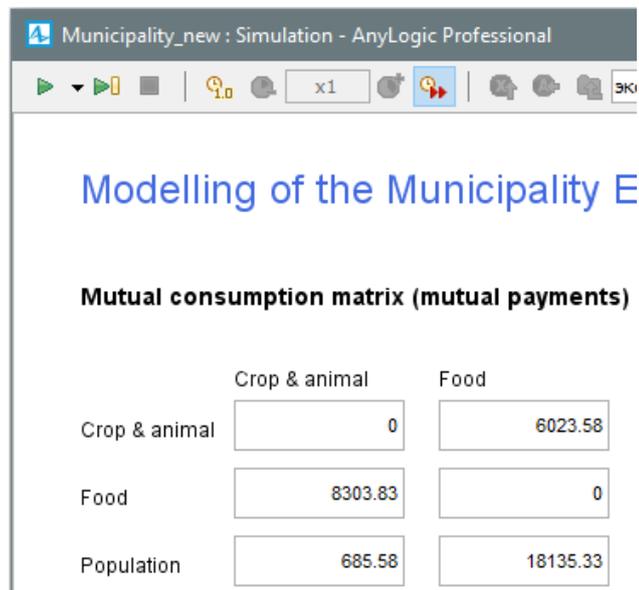


Рисунок 2. Экранная форма для ввода исходных данных и настройки параметров модели (фрагмент)

Вторая экранная форма содержит диаграмму причинно-следственных связей – основной интерфейс системно-динамической модели. Её фрагмент можно увидеть на рис. 3.

Все элементы модели сгруппированы в шесть логических блоков. Четыре из них соответствуют сетевым партнёрам, один – внешней среде. Шестой блок (регулятор управления обменом) объединяет расчёт результирующих показателей и управляющих параметров модели.

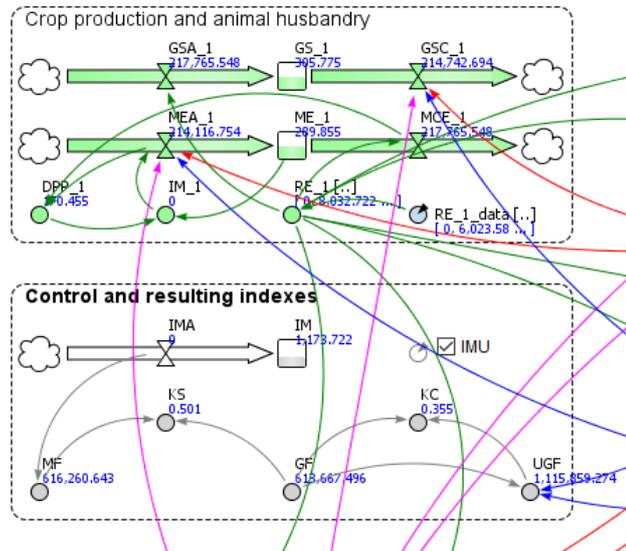


Рисунок 3. Диаграмма причинно-следственных связей системно-динамической модели (фрагмент)

2. РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Кроме диаграммы причинно-следственных связей на втором экране располагаются графики результирующих показателей модели. Они представлены на рис.4:

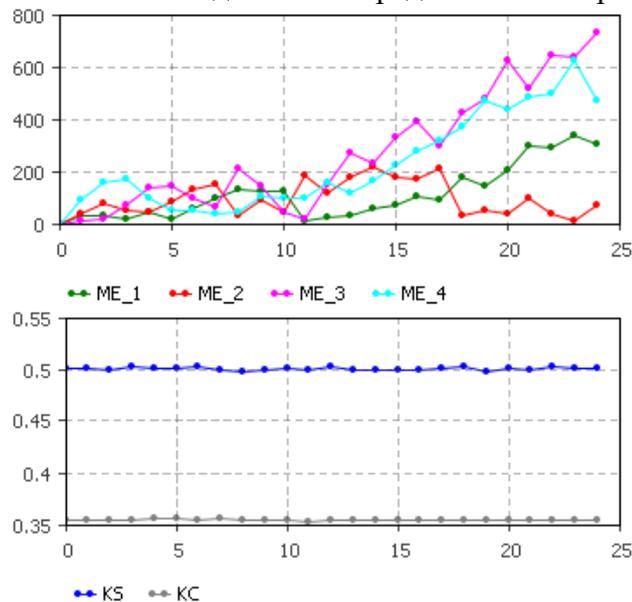


Рисунок 4. Графики результирующих показателей модели

Приведенные графики построены по результатам эксперимента, в котором в систему были введены внутренние деньги. На первом графике отображено в динамике количество денежных средств сетевых партнёров (ME_n). Этот показатель отражает способность предприятия к дальнейшему участию в обмене. График демонстрирует, что значение показателя не опускается ниже нуля даже при самом неблагоприятном раскладе.

Следовательно, все сетевые партнёры всегда имеют возможность обмена. Это положительно отражается на деятельности предпринимательской сети.

Второй график построен по значениям двух коэффициентов, отражающих состояние системы:

- коэффициент обеспеченности товара деньгами (ликвидности) (KS) – характеризует объем денег, циркулирующий в системе относительно количества товаров, нормативное значение – 0,2;
- коэффициент кооперации (КС) – характеризует эффективность связей и уровень обмена между различными участниками предпринимательской сети, нормативное значение – 0,3.

Оба показателя превышают свои нормативные значения на всех этапах функционирования предпринимательской сети. Это свидетельствует о благоприятном влиянии внутренних денег на экономику предпринимательского сообщества.

Полученные результаты моделирования хорошо согласуются с реальными статистическими данными и результатами расчётов по агентно-ориентированной модели [9].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Уже сейчас разработанное приложение является эффективным инструментом поддержки принятия решений по управлению сетевым взаимодействием предприятий муниципалитета. Оно обладает всеми преимуществами классической системно-динамической модели. Приложение позволяет отследить состояние коммуникаций и обмена на разных промежутках времени и с разными исходными условиями. Также оно визуализирует архитектуру сети и потоки обмена между участниками. Это даёт возможность определить наиболее эффективные условия реализации товарно-денежных отношений внутри сети и за ее пределами. При этом приложение лишено главного недостатка имитационных моделей – зависимости от специализированного программного обеспечения. Оно может быть запущено на любом компьютере вне среды моделирования.

Кроме того, предложенное приложение имеет широкие перспективы развития. Оно может стать основой информационной системы, включающей хранилища данных, интерфейсы, другие приложения и модели. Эти возможности снимают большинство ограничений при разработке инструментария поддержки принятия управленческих решений. Такую систему планируется реализовать в рамках дальнейших исследований.

Благодарность

Настоящее исследование выполнено при финансовой поддержке гранта Российского фонда фундаментальных исследований №19-010-00974 «Экспериментальные институциональные модели автономизации финансов местных сообществ в условиях снижения доверия населения к участию в бюджетном процессе».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Forrester J.W. Counterintuitive behavior of social systems / J.W.Forrester // *Technology Review*. –1971. – Vol. 73. – № 3. – P. 52-62.
2. Гераськин М.И. Согласование экономических интересов в корпоративных структурах / М.И. Гераськин. – М.: ИПУ РАН, Анко, 2005. – 293 с.
3. Маслобоев А.В. Информационная технология дистанционного формирования и управления моделями системной динамики [Электронный ресурс] / А.В. Маслобоев, А.Г. Олейник, М.Г. Шишаев // *Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики*. – 2015. – №4. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/informatsionnaya->

tehnologiya-distantsionnogo-formirovaniya-i-upravleniya-modelyami-sistemnoy-dinamiki (дата обращения: 07.04.2019).

4. Янкевский А.В. Система имитационного динамического моделирования производственных процессов [Электронный ресурс] / А.В. Янкевский, К.К. Кушеков, Р.Б. Джимиева // Вестник РУДН. Серия: Инженерные исследования. – 2008. – №3. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/sistema-imitatsionnogo-dinamicheskogo-modelirovaniya-proizvodstvennyh-protsessov> (дата обращения: 07.04.2019).

5. Акопов А.С. К вопросу о реализации эконометрических моделей на веб-сервере с обеспечением многопользовательского доступа [Электронный ресурс] / А.С. Акопов // Бизнес-информатика. – Москва : Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики». – 2011. – №2 (16) – С. 3-11. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=16501902> (дата обращения: 07.04.2019).

6. Борщев. А.В. Миграция имитационного моделирования в облако [Электронный ресурс] / А.В. Борщев // ИММОД-2017. – Санкт-Петербург. – URL: <https://www.anylogic.ru/resources/articles/migratsiya-imitatsionnogo-modelirovaniya-v-oblako/> (дата обращения: 10.04.2020).

7. Publish models to Web [Электронный ресурс] // Powersim Software AS, 2019 URL: <https://www.powersim.com/main/services/publish-models/> (дата обращения: 07.04.2019).

8. Modelling of the Municipality Entrepreneurial Community Functioning Using the Methods of System Dynamics [Электронный ресурс] / D.B. Berg, A.O., Kolomytseva, A.V. Apanasenko, K., F. Isaichik // IFAC-PapersOnLine. – 2018. – С. 61-66. URL: <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2018.11.354> (дата обращения: 07.04.2019).

9. The model of localized business community economic development under limited financial resources: computer model and experiment [Электронный ресурс] / D. Berg, R. Davletbaev, O. Zvereva, D. Nodjenko // Электронный журнал «E3S Web of Conferences». – 2016. – Vol.6. – p.01001. URL: <http://dx.doi.org/10.1051/e3sconf/20160601001> (дата обращения: 07.04.2019).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Апанасенко Анастасия Владимировна
Уральский федеральный университет
Аспирант кафедры анализа систем и принятия решений
Телефон: +7 996 185 63 00
e-mail: stacy-chan@yadex.ru
Екатеринбург, Россия

Берг Дмитрий Борисович, профессор, д.ф.-м.н.
Уральский федеральный университет
Профессор кафедры анализа систем и принятия решений
Телефон: +7 922 208 77 65
e-mail: bergd@mail.ru
Екатеринбург, Россия

**DEVELOPMENT OF AN APPLICATION TO SUPPORT DECISION-MAKING FOR
MANAGING AN ENTREPRENEURIAL NETWORK BASED ON A SYSTEM-DYNAMIC
MODEL**

Anastasiya V. Apanasenko, Dmitry B. Berg

Abstract. The article describes application development based on a simulation system-dynamic model. The integration methods of simulation models with external systems are analyzed. The most optimal integration method is recognized as exporting the model in the form of program code. This code can be embedded in external information systems or work as a standalone application. The method was tested on the system-dynamic model of the municipality entrepreneurial network. The result is a java application to support decision-making for managing an enterprise network. It has all the advantages of a model, but is devoid of its main drawback. It is the need for a simulation environment to run. In addition, the proposed application has broad development prospects and may subsequently become the basis of the information system. Such a system will become an even more effective tool for supporting management decision-making.

Keywords: entrepreneurial network, simulation, system dynamics, java application, integration, decision support, management, commodity-money exchange.

AUTHORS INFORMATION

Anastasiya V. Apanasenko
Ural Federal University
Postgraduate of the Department of Systems Analysis and Decision-Making
phone: +7 996 185 63 00
e-mail: stacy-chan@yadex.ru
Yekaterinburg, Russian Federation

Dmitry B. Berg, Professor, Mathematics and Physics, Doctor.
Ural Federal University
Professor of the Department of Systems Analysis and Decision-Making
phone: +7 922 208 77 65
e-mail: bergd@mail.ru
Yekaterinburg, Russian Federation