

Применение имитационного моделирования при оперативном управлении сложными системами

Т.В. Девятков¹, В.В. Девятков^{2,3*}, А.В. Габалин⁴

¹ООО «Элина-Компьютер», Казань, Россия

²Институт прикладных исследований Академии наук Республики Татарстан, Казань, Россия

³Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева, Казань, Россия

⁴Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, Москва, Россия

*vladimir@elina-computer.ru

Аннотация. В статье анализируются вопросы применения имитационных моделей для решения задач управления сложными системами. Описывается история вопроса – постепенное расширение направлений их использования в управлении. Отмечаются достаточно успешные результаты использования имитационных моделей для стратегического управления сложными системами в самых различных областях, например работы, описанные в [6, 7]. Упомянуто, что достаточно большое время исполнения большинства имитационных моделей затрудняет применение их в оперативном управлении, особенно для сложных систем. Предлагаются перспективы решения этой проблемы, связанные с синергией множества объективных факторов: появлением принципиально новых вычислительных возможностей, использованием современных концепций имитационных исследований, комбинацией метода имитационного моделирования с многофакторной оптимизацией и использованием модели в качестве решателя. Предоставление возможности проведения оптимизирующих экспериментов с моделью позволяет находить и рекомендовать наилучшие направления развития системы. Эффективность применения оптимизирующих экспериментов показана в статье для нахождения варианта оптимального планирования выпуска продукции нефтеперерабатывающим предприятием. Успешно была апробирована технология получения оптимального решения в среде моделирования за счет подключения к среде моделирования GPSS Studio комплекса многопараметрической оптимизации IOSO. По результатам работы был сделан вывод, что в перспективе получение оптимального решения позволит использовать имитационную модель в качестве автоматического «интеллектуального решателя» в автоматизированных процессах производственного планирования. Проведенный анализ и оценки показали, что комплексное использование всех новых возможностей обеспечивает достижение синхронизации времени исполнения модели и требуемого времени реакции на выработку управляющего решения. Делается вывод о начале активного использования метода имитационного моделирования для оперативного управления сложными системами.

Ключевые слова: имитационное моделирование, GPSS Studio, управление, оптимизационно-имитационный подход, решатель

Для цитирования: Девятков Т.В., Девятков В.В., Габалин А.В. Применение имитационного моделирования при оперативном управлении сложными системами // Прикладная информатика. 2023. Т. 18. № 2. С. 60–72. DOI: 10.37791/2687-0649-2023-18-2-60-72

Simulation modeling application in complex system management

T. Devyatkov¹, V. Devyatkov^{2,3*}, A. Gabalin⁴

¹LLC Elina-Computer, Kazan, Russia

²Institute of Applied Research Tatarstan Academy of Sciences, Kazan, Russia

³Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev, Kazan, Russia

⁴V.A. Trapeznikov Institute of Control Sciences of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

*vladimir@elina-computer.ru

Abstract. The article analyses the issues of the simulation models application in the large systems management. The background of the issue, specifically, the gradual increase of the models application domain in the management, is described. Quite successful results of the simulation models application in the strategic management of complex systems in different branches are noticed, for example, the works described in [6, 7]. It is mentioned that quite long execution time of most simulation models make it difficult to use them in the operational management, especially for complex systems. The possible solutions of this problem related to the synergy of multiple factors, primarily the emergence of the fundamentally new computational capabilities, use of contemporary concepts of simulation investigations, a combination of the simulation modeling with the multi-factor optimization, the use of the model as a solver, are proposed. The ability to conduct optimizing experiments with the model allows to find and recommend the best ways of the system development. The effectiveness of the simulation experiments application is shown in this article for the optimal planning of the oil refining company output. The technique of the optimal solution finding in the modeling environment by means of the connection of the IOSO multiparameter optimization software to the GPSS Studio modeling environment was successfully tested. Based on the results of the work, it was concluded that in the future the technique of optimal solution finding will allow use of the simulation model as an automatic “intellectual solver” in automatic production planning processes. The analysis and estimations performed showed that the integrated use of all new possibilities ensures the synchronization of the model execution time and the required time bounds of the management solution production. The conclusion about the beginning of active use of the simulation modeling method for the complex systems operational control is made.

Keywords: simulation modeling, GPSS Studio, control, optimization and simulation approach, solver

For citation: Devyatkov T., Devyatkov V., Gabalin A. Simulation modeling application in complex system management. *Prikladnaya informatika=Journal of Applied Informatics*, 2023, vol.18, no.2, pp.60-72 (in Russian). DOI: 10.37791/2687-0649-2023-18-2-60-72

Введение

Появление в середине прошлого века программных инструментов, реализующих метод имитационного моделирования (далее – ИМ), позволило значительно расширить рамки практического системного анализа сложных систем. Это было важно по трем причинам. Во-первых, сложность окружающих систем неуклонно возрастила – увеличивалось количество элементов систем и связей между ними, усложнялись логика и алгоритмы функционирования отдельных элементов и системы в целом. Во-вторых, применение аналитических моделей, использующих методы теории систем массового обслуживания, сетей Петри, линейного программирования, из-за существенных

теоретических ограничений не позволяло глубоко и качественно исследовать многие системы, а тем более применить результаты в управлении системой. В-третьих, расширялся круг потенциальных пользователей, которые далеки от математики и которым необходимы были удобные, понятные и доступные инструменты анализа и управления. В результате применение ИМ существенно смягчило эти проблемы.

Прошли годы, и постепенно ИМ заняло достойное место в системном анализе на всех этапах жизненного цикла системы – при ее проектировании, в процессе эксплуатации системы и в условиях ее модернизации. За относительно небольшие средства и в приемлемые сроки можно было создать модель с высоким уровнем детализации и обеспечить решение многих задач ее исследования, в том числе задач стратегического планирования и управления системой. Но при очередном витке развития и продолжающемся усложнения систем появляются проблемы с использованием ИМ – требуется создание еще более детальных моделей, и при этом длительность создания модели и время ее исполнения должны быть снижены, так как не успевают за реальными потребностями.

Например, сложно было использовать имитационную модель в контуре оперативного управления системой. Причиной этого был целый ряд причин, среди которых можно выделить основные: значительное время исполнения моделей, высокие требования к уровню компетенции пользователей. Все это делало невозможным массовое использование метода. Необходимо отметить, что к этому моменту потенциал использования ИМ был на порядок выше, чем возможности его использования. Т. е. многие хотели применить ИМ, понимали важность, а иногда и безальтернативность этого метода, но не могли этого сделать. По результатам наших исследований [3] в России реализовывалось не более нескольких процентов потенциальных применений.

- Основные причины потери рынка:
- значительная длительность исследования;
 - высокие требования к исследователю;
 - высокая стоимость;
 - у заказчика нет информации о методе;
 - существующие инструменты не решают задачу;
 - законодательные и административные барьеры.

Казалось, что в первые десятилетия XXI века ИМ как технология прошла пик своего развития, новых идей, подходов и программных технологий было мало.

Но это было не так. Благодаря стремительному росту производительности вычислений, появлению множества прорывных информационных технологий и совершенствованию концепций и методов проведения имитационных исследований в настоящее время наблюдается значительный рост применений ИМ. Рассмотрим объективные причины этого роста более подробно.

Ренессанс ИМ

В последние десятилетия постоянно происходил рост мощности компьютеров. Кроме этого, появилось множество новейших технологий, позволяющих повысить также производительность вычислений. В результате доступная вычислительная мощь увеличилась в тысячи и более раз. И прикладное программное обеспечение (в том числе и ИМ) не успевало сразу за этим прогрессом. Системы ИМ долгое время не были адаптированы под такие изменения и не использовали новое окно возможностей.

Постепенно прикладная программная индустрия отреагировала на этот рывок, и стало появляться множество современных информационных технологий, которые существенно расширяют круг возможностей и областей применения программ и упрощают процесс использования компьютера пользователем. Естественно, данные технологии стали постепенно использоваться и в ИМ. Например, следует

отметить активную разработку направления облачного моделирования. Такие возможности появились во многих языках ИМ – GPSS Studio¹, AnyLogic², Simio³ и т. д. Причем появились не просто сервисы обмена результатами исследований и имитационными моделями, но и сервисы распределенного проведения исследования, удаленные сервисы планирования экспериментов и оптимизации, общие сервисы для исходных данных, моделей и результатов моделирования и др.

На основе новых информационных технологий постепенно совершенствовались и концепции проведения имитационного исследования, позволившие систематизировать, объединить и автоматизировать большинство действий пользователя в процессе имитационного исследования.

Раньше процесс имитационного исследования, как реализация последовательного исполнения традиционных этапов ИМ, представлял собой целый комплекс – для различных направлений исследования в автономном режиме использовались программные средства многих разработчиков, например, для обработки статистики – Stat::FIT [9], для оптимизации – OptQuest [10], для анимации – Proof Animation [11] и т. д. Во всем этом разнообразии нужно было разобраться: изучить, применить и передать результат на другой этап.

В последние годы стали появляться решения, объединяющие информационно и функционально весь процесс имитационного исследования в рамках единого исследовательского пространства. В качестве примера можно привести успешные работы компании «Амальгама»⁴. Это позволило существенно

¹ Официальный сайт компании «Элина Компьютер». URL: <http://elina-computer.ru/>

² Официальный сайт компании AnyLogic. URL: <https://www.anylogic.ru/>

³ Официальный сайт компании SIMIO. URL: <https://www.simio.com/>

⁴ Официальный сайт компании «Амальгама». URL: <https://mine-twin.ru/reshenie-prakticheskikh-zadach-organizacii-raboty-ugolnogo-karera-s-pomoshchju-instrumenta-minetwin/>

расширить области использования и упростить применение ИМ.

В дальнейшем изложении материала статьи, в качестве того или иного практического примера развития ИМ, будем приводить примеры из отечественной среды моделирования GPSS Studio [4] как наиболее близкого и знакомого авторам инструмента ИМ. Тем более, что в рамках среды GPSS Studio удалось на практике реализовать усовершенствованную методологию проведения имитационных исследований, реально объединяющих все этапы исследования. Применение данной методологии позволило унифицировать обмен данными между этапами, создать спецификации языка взаимодействия модели и пользователя – при вводе исходных данных, планировании экспериментов, анализе результатов моделирования и формировании отчета об исследовании (рис. 1).

Интеграционные решения в языках и системах ИМ позволили решить многие текущие проблемы. Например, появление графического редактора с его возможностями декомпозиции моделей и наличием библиотек моделей в GPSS Studio позволило в сотни раз увеличить возможный размер имитационных моделей, а следовательно, и возможности исследования больших систем.

В такой ситуации важнейшим фактором, особенно для моделей систем большого масштаба, является возможность их верификации и валидации. Для этой цели в языках и системах ИМ больше внимания уделяется промышленному тестированию моделей. Действительно, когда моделируемая система огромна по масштабам, а модель ее имеет высокий уровень детализации, очень важно доказать, что модель работает правильно.

В GPSS Studio имеется специальный инструмент для этого – «Тестер ТЭБ», который совместно с иерархической структурной схемой позволяет программисту разработать тесты для всех элементов системы и модели в целом. При этом каждый тестируемый элемент представляется в виде «черного ящика»,



Рис. 1. Этапы проведения имитационного исследования в GPSS Studio

Fig. 1. The stages of simulation research in GPSS Studio

и на его вход подаются тестовые наборы, причем ответ элемента в системе на каждую комбинацию входов (тест) известен заранее. Затем осуществляется запуск каждой такой небольшой модели. Если результаты модели совпадают с запланированным результатом для всех комбинаций, то тест считается пройденным.

Если раньше максимум, с точки зрения построения понятной по логике и обслуживанию модели, составлял не более 5000 блоков GPSS, то сейчас создаются модели объемом в 300000 и более блоков GPSS. При этом модель понятна по структуре и функциям, в нее очень просто внести необходимые изменения, она легко тестируется и проста в дальнейшем сопровождении.

Другим важнейшим шагом в развитии концепции имитационных исследований является создание на основе отложенной модели специализированных имитационных приложений, направленных на пользователей – не-профессионалов ИМ, к которым относятся руководители, системные аналитики, менеджеры и инженеры. Приложение должно быть простым и удобным для проведения исследования и «общения» с пользователем на языке

предметной области моделируемой системы и иметь возможность взаимодействия при получении данных модели или передаче результатов моделирования с необходимыми автоматизированными системами, используемыми в конкретной области.

В GPSS Studio такая возможность есть благодаря наличию конструкторов диалогов ввода и вывода, позволяющих построить интерфейс взаимодействия пользователя при работе с моделью. В результате получается специализированное имитационное приложение, которое можно оторвать от среды и использовать автономно. Для его исполнения требуется только ядро моделирования GPSS World Core. В результате в рамках приложения создается необходимый набор инструментов: ввода данных, создания сценариев исследования, проведения экспериментов (в том числе и оптимизирующих), представления результатов экспериментов, сохранения их в БД моделирования и автоматизированного формирования отчетов об исследовании. Общая схема процесса исследования в имитационном приложении приведена на рисунке 2.

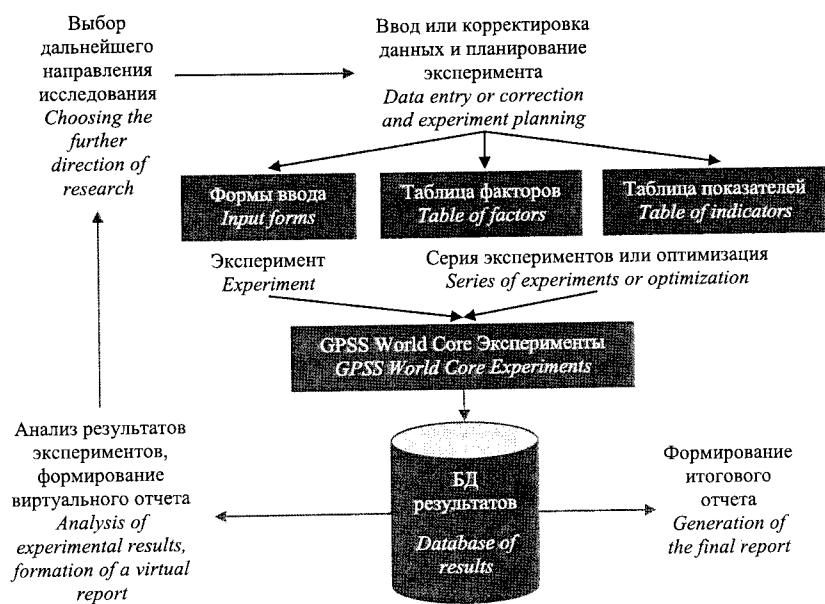


Рис. 2. Схема проведения имитационных экспериментов в GPSS Studio

Fig. 2. The scheme of simulation experiments in GPSS Studio

Учитывая, что в наиболее мощных системах ИМ имеется возможность проведения оптимизационных экспериментов и получение наилучшего решения по выбранным критериям и ограничениям, то и качество формируемого управляющего решения в этих системах существенно повысилось.

Таким образом, современные системы и языки ИМ сейчас могут практически с любым уровнем детализации, высокой степенью автоматизации, возможностью нахождения наилучшего решения более интенсивно использоваться в исследовании, прогнозировании и управлении действительно большими системами. В большинстве случаев достигается главное – время создания модели и время реализации сценария по формированию управляющего решения соответствует темпу принятия решений в реальной системе.

ИМ в оперативном управлении

Использование модели при принятии решений давно стало повседневной практикой для большинства сложных систем, но с существенными оговорками – в основном, это стратегический и тактический уровень управления системой. ИМ применяется в управлении там, где важнее получить качественное управляющее решение (а имитационная модель обеспечивает именно такое решение)

и в меньшей степени существуют ограничения по времени его формирования. Именно такие случаи описываются в публикациях об имитационно-оптимизационном подходе, например в [1, 2]. Поэтому имитационная модель сможет сформировать самое сложное управляющее решение для стратегического и тактического уровня управления.

Сложнее использовать ИМ в оперативном управлении системой.

Основным препятствием использования имитационной модели в оперативном управлении системой всегда были два основных фактора – сложность включения модели в контур реального управления в виде обратной связи (в автоматизированном или автоматическом режиме) и достижения необходимой скорости формирования управляющего воздействия, обычно существенно отстававшего от требуемого времени реакции в реальной жизни.

Рассмотрим подробнее, как решаются эти проблемы в современных языках и системах ИМ.

Создание независимых от сред и языков моделирования имитационных приложений позволяет успешно преодолеть первую проблему. Например, включать имитационное приложение в систему управления в виде так называемого решателя. В самом общем виде использование модели в качестве автоматизированного решателя можно представить следующим образом (рис. 3).

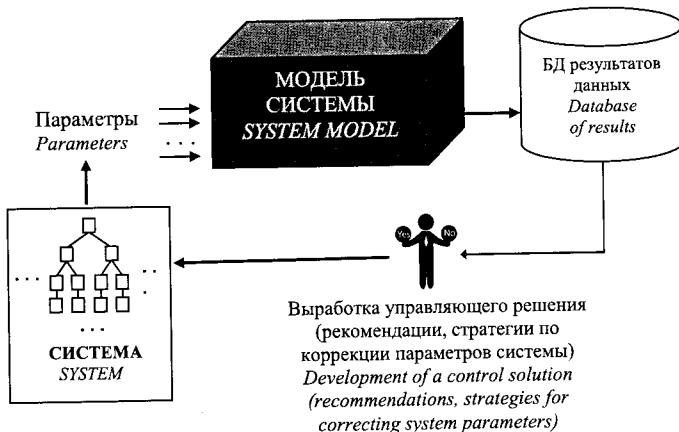


Рис. 3. Схема использования модели в качестве автоматизированного решателя
Fig. 3. The scheme of using the model as an automated solver

Исходя из схемы, система периодически выдает текущие параметры своей работы, которые обрабатываются специальной программой, и на вход модели подается уже сформулированная задача с необходимыми исходными данными. Модель в результате эксперимента формирует ответ, который можно использовать в качестве управляющего решения для системы, если это необходимо. При этом в сценарном плане модели должна быть обеспечена реализация необходимого и четко ограниченного множества задач решателя. Кроме этого, для всех сценариев реализации модели должны быть доступны и все необходимые исходные данные.

Решатель может вызываться в программном обеспечении управления системой самыми различными способами – от программной процедуры до специально созданного API. Он может быть по отношению к программному обеспечению управления системой либо его внутренней частью, либо внешним модулем. Кроме этого, в зависимости от конкретной системы, принцип использования решателя может быть либо автоматическим (без участия человека), либо автоматизированным, когда основное бремя принятия решения лежит на человеке, а решатель дает подсказку (как и показано на рис. 3).

Вторая проблема – время выработки управляющего решения не соответствует темпу принятия решений, и модель не успевает сформировать решение в необходимое время. Долгое время не было существенных результатов в устранении этой проблемы.

Пониженная скорость реализации экспериментов существенно ограничивает использование ИМ в оперативном управлении. А изменить ее за счет только оптимизации кода имитационной модели практически невозможно. Современная методология и технология реализации имитационных исследований позволяет в большинстве случаев решить и эту проблему.

Достигается это созданием прогнозных платформ управления, использующих для

формирования управляющего решения различные способы:

- Предварительный поиск и накопление большого объема данных о системах, обработка этих данных для последующего создания модели и имитационного приложения.
- Перенос экспериментов с приложениями на более производительное оборудование (использование мощных серверов, по возможности применение параллельных вычислений и реализация концепции облачного моделирования).
- Накопление результатов моделирования в БД и использование ее при реализации очередного сценария для быстрого поиска однотипных результатов (в этом случае моделирование не производится).
- Наряду с методом ИМ при разработке модели и приложения иметь возможность использовать комплексно любые другие расчетные и аналитические модели как перед моделированием, так и в процессе исполнения модели.
- Заменять отлаженное и верифицированное приложение на быстрое программно-аппаратное решение, например ассоциативный вычислитель, позволяющий обучать его через модель так, что на определенный набор входов гарантированно и, самое главное, быстро будет искааться необходимый набор выходов и формироваться управляющее решение.

Сначала создается имитационное приложение, затем производится его валидация и верификация. После этого приложение реализуется в виде решателя и апробируется в контуре оперативного управления. Если время выработки управляющих решений решателем не соответствует темпу принятия решений в реальной системе, возможно применение дополнительных методов и моделей, позволяющих ускорить его работу. Кроме накопления в базе данных как можно большего количества реализаций возможных сценариев, одним из таких

методов, возможно, является создание нейронной сети моделируемой системы и последующего обучения ее с использованием уже готовой, но медленной имитационной модели. В процессе обучения реализуется все множество предполагаемых сценариев на возможном пространстве изменения варьируемых факторов системы, и для каждого сценария фиксируются все показатели модели с вариантами управляющих решений. Т. е. каждому сценарию моделирования ставится в соответствие результат прогона имитационной модели. В результате после обучения нейронная сеть, возможно, сможет успешно заменить имитационную модель, а время расчета показателей для выработки управляющих решений сократится во много раз. Конечно, при любом изменении модели необходимо будет как модернизировать нейронную сеть, так и дополнительно ее обучить. Но такая комбинация методов скорее всего позволит практически использовать ИМ для принятия решений при управлении системами гораздо большего масштаба, чем это возможно сейчас.

Оптимальное планирование производства нефтеперерабатывающего завода

Необходимым условием обеспечения функций управления в современных языках ИМ является наличие возможности проведения оптимизирующих экспериментов. Недостатком традиционной системы планирования и реализации экспериментов в виде отдельных экспериментов и серий экспериментов является субъективность предлагаемого управляющего решения. Это решение в большей степени является зависимым от профессионализма исследователя, его знаний и умений. А необходимо объективно лучшее решение. Достичь этого удается использованием оптимизации для направленного поиска оптимума по выбранному критерию при заданных ограничениях. Несмотря

на общеизвестные принципы проведения оптимизирующих экспериментов, в каждом инструменте ИМ имеются свои особенности и нюансы. Рассмотрим методику и технологию проведения таких экспериментов в имитационных приложениях, созданных в среде моделирования GPSS Studio, на примере модели планирования объемов производства на нефтеперерабатывающем заводе (НПЗ). Подробное описание задачи планирования продаж продукции НПЗ и ее решение с помощью имитационной модели приведено в [5].

Ставилась цель – увеличения прибыли предприятия за счет вариации параметров закупки и производства, а также снижения суммы операционных затрат предприятия (обслуживание установок, стоимость приобретаемого сырья и продуктов). При этом считается, что план продаж (запланированные объемы продаж и возможные доходы от продаж) уже рассчитан в рамках другого бизнес-процесса.

В имитационной модели учитывается логистика поставки нефти нескольких сортов и множества химических реагентов, требуемых для производства нефтепродуктов – $V_{\text{пост}} = \{V_{\text{пост}}^i\}$. Также внутри модели реализованы технологические процессы переработки нефти в установках, которые могут перенастраиваться на различные режимы работы с изменением объемов производства промежуточных продуктов $\Pi_{\text{тех}} = \{\Pi_{\text{тех}}^j\}$. В итоге необходимо так подобрать параметры логистики и производства и обеспечить выполнение необходимых ограничений по ним, чтобы за определенный период времени обеспечить выпуск нефтепродуктов $V_{\text{прод}} = \{V_{\text{прод}}^k\}$ – различных бензинов, дизельного топлива и т. д., соответствующий сформированному рынком плану продаж при минимальном объеме операционных затрат $C_{\text{затрат}} = \{C_{\text{затрат}}\}$:

$$C_{\text{затрат}} = F(V_{\text{пост}}, \Pi_{\text{тех}}, V_{\text{прод}}) \rightarrow \min. \quad (1)$$

При соблюдении следующих ограничений по логистике, технологиям и объемам продаж:

$$\begin{aligned} a_i < V_{\text{пост}}^i < b_i, \text{ где } i = 1, n, \\ c_j < \Pi_{\text{тех}}^j < d_j, \text{ где } j = 1, m, \\ g_k < V_{\text{прод}}^k < b_k, \text{ где } k = 1, l. \end{aligned}$$

Такую задачу сложно решить аналитически. В частности, в известном программном продукте Symphonite компании Honeywell¹, в подсистеме планирования выпуска продукции на НПЗ Refinery and Petrochemical Modeling System (RPMS), для этого используются численные методы линейного программирования. Это очень сложная процедура, требующая кропотливой работы с матрицами огромной размерности. Использование имитационного моделирования в сочетании со встроенными black box системами оптимизации позволяет решать такие задачи гораздо проще.

Рассмотрим организацию и проведение оптимизационных экспериментов в GPSS Studio.

- Сначала разрабатывается и отлаживается модель.
- Затем, когда проведена верификация и валидация модели, на ее основе строится предметно-ориентированное имитационное приложение с диалогами ввода данных, планирования экспериментов и вы-

¹ Официальный сайт компании Honeywell (США). URL: <https://www.honeywell.com/us/en>

Ввод данных	Планирование	Моделирование	Результаты	
Метод планирования экспериментов:				
Пресеты ▾ Оптимизация				
Факторы	Целевые показатели	План серии экспериментов	Параметры метода	
Название	Начальное значение	Минимальное значение	Максимальное значение	Участвует в эксперименте
DISC1	0	0	400	<input type="checkbox"/>
DISC2	260	260	700	<input checked="" type="checkbox"/>
REF95	2	2	60	<input checked="" type="checkbox"/>
REF100	0	0	58	<input type="checkbox"/>
FCCNA	0	0	136	<input type="checkbox"/>
FCCGO	0,01	0,01	136	<input type="checkbox"/>

Рис. 4. Постановка задачи оптимизации в GPSS Studio

Fig. 4. Setting the optimization problem in GPSS Studio

вода результатов. Используя приложение, пользователь может реализовывать различные сценарии исследования, проводя одиночные эксперименты, серии экспериментов и оптимизирующие эксперименты с моделью. В случае планирования оптимизирующего эксперимента пользователь должен в форме планирования экспериментов задать:

- факторы – варьируемые параметры системы и существующие структурные, технологические, экономические и т. д. параметры в определенных пользователем интервалах вариации;
- ограничения – перечень показателей функционирования системы (длина очедей, время реакции, производительность и т. д.) с заданными диапазонами допустимых изменений;
- критерии – показатели функционирования системы, которые необходимо минимизировать или максимизировать.

Пример диалогов по заданию диапазонов вариации факторов и допустимых границ значений ограничений, а также критериев оптимизации показан на рисунке 4. Приведенный пример – это сценарий оптимизации с двумя факторами, двенадцатью ограничениями и одним критерием.

Количество выбранных факторов, ограничений и критериев определяется только задачей исследования. По сути, это интерактивное описание формулы (1) на языке диалогов в среде моделирования. Необходимо отметить, что, несмотря на возможности описания и решения многопараметрических задач, пользоваться этим нужно чрезвычайно аккуратно. Это связано с резким усложнением объема вычислений, увеличением времени поиска оптимального решения и повышением вероятности того, что оптимальное решение не будет найдено. Хотя практика применений показывает, что при разумном усложнении задачи оптимизации она решается практически в 90% случаях.

3. Реализация оптимизирующего эксперимента. Для этого осуществляется запуск эксперимента и ожидание получения результата. Во время выполнения оптимизации на экране динамически отображается график зависимости показателей от факторов, а также таблица со значениями всех факторов, целевых параметров и ограничений. Оптимальное решение выделяется более крупной точкой на гра-

фике и подсвечивается в таблице. На рисунке 5 представлен пример динамики хода процесса оптимизации. Сразу после того, как оптимальное решение было найдено, пользователь может проанализировать таблицу и график оптимизационного эксперимента на предмет поиска близких решений, понимания адекватности задания тех или иных ограничений. Если оптимальное решение (в случае многопараметрической оптимизации – множество оптимальных решений) найдено, то результаты оптимизационного эксперимента можно просмотреть во вкладке результатов в БД результатов. Это дает возможность анализа результатов позже, в рамках последующих диалоговых сессий работы с приложением.

Следует отметить, что в качестве оптимизатора в среду моделирования GPSS Studio включен комплекс программ оптимизации по технологии IOSO, разработанный отечественной компанией «Сигма Технологии»¹ [8].

¹ Официальный сайт компании «Сигма Технологии». URL: <http://www.iosotech.com/ru/>

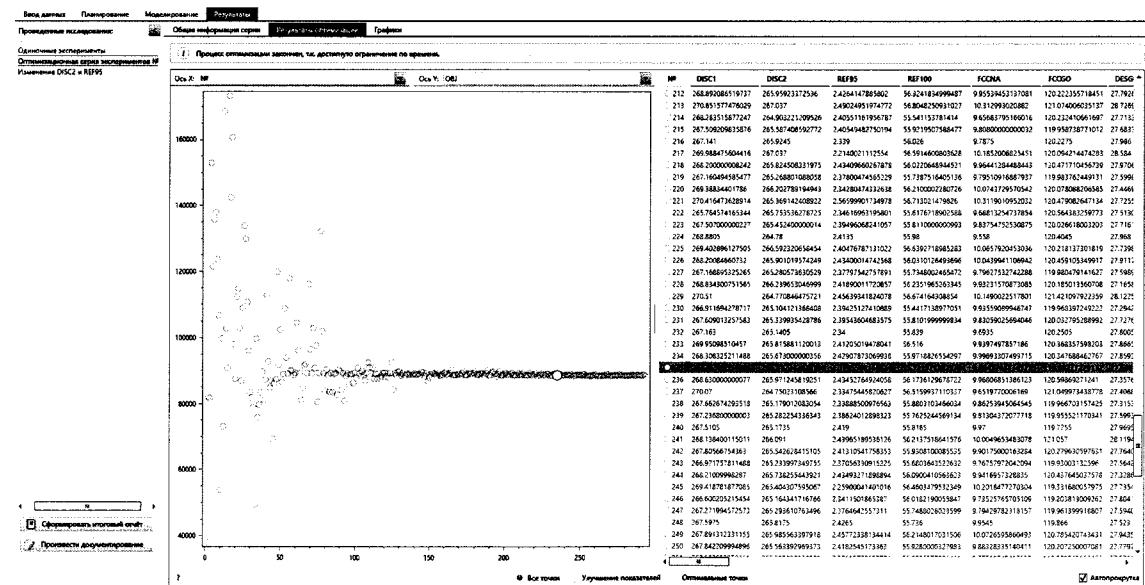


Рис. 5. Ход проведения оптимизирующего эксперимента

Fig. 5. The displaying the progress of the optimization experiment

4. Результаты оптимизирующего эксперимента могут быть записаны в базу данных результатов моделирования и впоследствии использованы при подготовке управляющего решения при стратегическом и тактическом планировании. А в случае быстрого исполнения оптимизирующего эксперимента приложение может быть включено в контур оптимального управления.

Заключение

Таким образом, современное состояние теории, методов и технологий ИМ позво-

Список литературы

- Антонова Г.М., Циркун А.Д. Оптимизационно-имитационное моделирование для решения проблем оптимизации современных сложных производственных систем // Проблемы управления. 2005. № 5. С. 19–27.
- Габалин А. В. Вопросы оптимизации структуры распределенных систем обработки информации // Прикладная информатика. 2007. № 6 (12). С. 129–139.
- Девятков В. В. Эволюция имитационных исследований от «искусства и науки» к массовому применению // Труды Восьмой всероссийской научно-практической конференции «Имитационное моделирование. Теория и практика» (ИММОД-2017). – СПб.: Изд-во ВВМ, 2017. С. 27–36.
- Девятков В. В., Девятков Т. В., Федотов М. В. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ GPSS Studio 2021680076, 07.12.2021; заявка № 2021669832 от 07.12.2021.
- Девятков В. В., Маряшина Д. Н., Марков С. А. Оптимальное планирование производства нефтепродуктов нефтеперерабатывающего завода // Труды Девятой всероссийской научно-практической конференции «Имитационное моделирование. Теория и практика» (ИММОД-2019). – Екатеринбург: Урал. гос. пед. ун-т, 2019. С. 451–456.
- Морозов А.Л., Малыханов А.А. Моделирование внепечной обработки меди: создание планировщика и библиотеки моделирования мостовых кранов // Труды Девятой всероссийской научно-практической конференции «Имитационное моделирование. Теория и практика» (ИММОД-2019). – Екатеринбург: Урал. гос. пед. ун-т, 2019. С. 185–190.
- Топаж А.Г., Егоров С.В., Буюнов А.С., Карпенко А.А., Малыханов А.А. Планирование работы ледокольного флота в имитационных моделях морских арктических транспортных систем // Труды Десятой всероссийской научно-практической конференции «Имитационное моделирование. Теория и практика» (ИММОД-2021). – СПб.: АО «ЦТСС», 2021. С. 396–411.
- Egorov I.N., Kretinin G.V., Leshchenko I.A. Robust design optimization strategy of IOSO technology // Proceedings of the Fifth World Congress on Computational Mechanics. – Vienna, Austria, 2002. P. 1–8.
- Benneyan J. C. Fitting continuous and discrete distributions to data. Software Review Stat::Fit // OR/MS Today. February 1998. URL: <https://www.researchgate.net/publication/265105892> (дата обращения: 10.07.2022).
- The OptQuest Engine Java and .NET Developer's // OptTek Systems, Inc. – 69 p. URL: <http://www.opttek.com/> Documentation (дата обращения: 10.07.2022).
- Using proof animation. – 3rd edition. – Wolverine Software Corporation, 2002. – 375 p.

Сведения об авторах

Девятков Тимур Владимирович, ORCID 0000-0002-6419-0208, канд. техн. наук, заместитель директора, ООО «Элина-Компьютер», Казань, Россия, the-9th@yandex.ru
 Девятков Владимир Васильевич, ORCID 0000-0003-1570-8004, докт. экон. наук, главный научный сотрудник, Центр циркулярной экономики, Институт прикладных исследований Академии наук Республики Татарстан;

профессор, кафедра автоматизированных систем обработки информации и управления, Казанский национальный исследовательский технический университет им. А. Н. Туполева, Казань, Россия, vladimir@elina-computer.ru
Габалин Алексей Валерьевич, ORCID 0000-0002-4560-396X, научный сотрудник, лаборатория 49, Институт проблем управления им. В. А. Трапезникова Российской академии наук, Москва, Россия, gabalina@bk.ru

Статья поступила 18.11.2022, рассмотрена 30.11.2022, принята 13.12.2022

References

- Antonova G. M., Tsvirkun A. D. Optimization simulation for solving the optimization problems of modern complex industrial systems. *Problemy upravleniya=Control Sciences*, 2005, no.5, pp.19-27 (in Russian).
- Gabalin A. V. *Voprosy optimizatsii struktury raspredelennykh sistem obrabotki informatsii* [Issues of optimization of the structure of distributed information processing systems]. *Prikladnaya informatika=Journal of Applied Informatics*, 2007, no.6(12), pp.129-139.
- Devyatkov V. V. Evolution of simulation – from “arts and sciences” to mass application. *Trudy Vos'moi vserossiiskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii «Imitatsionnoe modelirovanie. Teoriya i praktika» (IMMOD-2017)* [Proceedings of the Eighth All-Russian Scientific and Practical Conference “Simulation Modeling. Theory and Practice” (IMMOD-2017)]. St. Petersburg, VVM Publ., 2017, pp.27-36 (in Russian).
- Devyatkov V. V., Devyatkov T. V., Fedotov M. V. *Svidetel'stvo o registratsii programmy dlya EVM GPSS Studio 2021680076*, 07.12.2021; zayavka № 2021669832 ot 07.12.2021 [Certificate of registration of the computer program GPSS Studio 2021680076, 07.12.2021; application no. 2021669832 dated 07.12.2021].
- Devyatkov V. V., Maryashina D. N., Markov S. A. Optimum planning of the production of petroleum products at the refinery. *Trudy Devyatoi vserossiiskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii «Imitatsionnoe modelirovanie. Teoriya i praktika» (IMMOD-2019)* [Proceedings of the Ninth All-Russian Scientific and Practical Conference “Simulation i praktika” (IMMOD-2019)]. Ekaterinburg, Ural State Pedagogical University Publ., 2019, modeling. Theory and Practice” (IMMOD-2019)]. Ekaterinburg, Ural State Pedagogical University Publ., 2019, pp.451-456 (in Russian).
- Morozov A. L., Malykhannov A. A. Simulation of copper production: development of process scheduler and portal cranes library. *Trudy Devyatoi vserossiiskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii «Imitatsionnoe modelirovanie. Teoriya i praktika» (IMMOD-2019)* [Proceedings of the Ninth All-Russian Scientific and Practical Conference “Simulation i praktika” (IMMOD-2019)]. Ekaterinburg, Ural State Pedagogical University Publ., 2019, modeling. Theory and Practice” (IMMOD-2019)]. Ekaterinburg, Ural State Pedagogical University Publ., 2019, pp.185-190 (in Russian).
- Topazh A. G., Egorov S. V., Buyanov A. S., Karpenko A. A., Malykhannov A. A. Icebreaker fleet management in simulation models of arctic marine transport systems. *Trudy Desyatoy vserossiiskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii «Imitatsionnoe modelirovanie. Teoriya i praktika» (IMMOD-2021)* [Proceedings of the Tenth All-Russian Scientific and Practical Conference “Simulation modeling. Theory and Practice” (IMMOD-2021)]. St. Petersburg, AO «CTSS» Publ., 2021, pp.396-411.
- Egorov I. N., Kretinin G. V., Leshchenko I. A. Robust design optimization strategy of IOSO technology. Proceedings of the Fifth World Congress on Computational Mechanics. Vienna, Austria, 2002, pp.1-8.
- Benneyan J. C. Fitting continuous and discrete distributions to data. Software Review Stat::Fit. OR/MS Today, February 1998. Available at: <https://www.researchgate.net/publication/265105892> (accessed 10.07.2022).
- The OptQuest Engine Java and .NET Developer's. OptTek Systems, Inc., 69 p. Available at: <http://www.opttek.com/> Documentation (accessed 10.07.2022).
- Using Proof Animation. 3rd edition. Wolverine Software Corporation, 2002, 375 p.

About the authors

Timur V. Devyatkov, ORCID 0000-0002-6419-0208, Cand. Sci. (Eng.), Deputy Director, LLC Elina-Computer, Kazan, Russia, the-9th@yandex.ru
Vladimir V. Devyatkov, ORCID 0000-0003-1570-8004, Dr. Sci. (Econ.), Leading Researcher, Center for the Circular Economy, Institute of Applied Research Tatarstan Academy of Sciences; Professor, Automated Systems and Economy, Institute of Applied Research Tatarstan Academy of Sciences; Professor, Management Department, Kazan National Research Technical University named after A. N. Tupolev, Kazan, Russia, vladimir@elina-computer.ru
Alexey V. Gabalin, ORCID 0000-0002-4560-396X, Researcher, Laboratory 49, V. A. Trapeznikov Institute of Control Sciences of Russian Academy of Science, Moscow, Russia, gabalina@bk.ru

Received 18.11.2022, reviewed 30.11.2022, accepted 13.12.2022

DOI: 10.37791/2687-0649-2023-18-2-73-84

Стратегическое управление в России: автоматизированное построение причинно-следственной диаграммы и выявление ключевых тем по данным СМИ

А. В. Заграновская^{*}

^{*}Санкт-Петербургский государственный экономический университет,
Санкт-Петербург, Россия
zagranet@rambler.ru

Аннотация. Современные условия хозяйствования отличаются высокой степенью неопределенности и сложности, слабо поддающейся формализации. Нечеткие когнитивные карты позволяют решить эту задачу – справиться со сложностью, но к построению когнитивных карт привлекают экспертов, объективность мнений которых может вызывать сомнения. В связи с этим задача разработки аналитического инструментария, позволяющего повысить осведомленность лиц, принимающих решения, о реальном положении дел в организации и во внешней среде, является актуальной, т. к. способствует росту эффективности их деятельности. В статье предложена и апробирована процедура автоматизированного построения причинно-следственной диаграммы с использованием статистических методов, а также методов и моделей машинного обучения. С помощью современных методов тематического моделирования выявляются ключевые темы (концепты) в рассматриваемой области за рассматриваемый промежуток времени. Далее используется модель Doc2Vec для того, чтобы получить числовой вектор фиксированной длины из выявленных тем. Затем используется тест Грэнджа, чтобы установить возможность причинно-следственной зависимости между найденными темами. Построенная причинно-следственная диаграмма позволяет описать текущую ситуацию и осознать ключевые концепты в рассматриваемой области. По данным российских СМИ за 20 лет (с 2002 по 2021 г.) была построена причинно-следственная диаграмма, отражающая проблемы стратегического управления в России. Проведенный анализ позволил сделать вывод, что тема, посвященная проектам России, является наиболее значимой в рассматриваемой области.

Ключевые слова: тематическое моделирование, выявление причинно-следственных связей, причинно-следственная диаграмма, меры центральности, стратегическое управление в России, методы машинного обучения, системный анализ

Для цитирования: Заграновская А. В. Стратегическое управление в России: автоматизированное построение причинно-следственной диаграммы и выявление ключевых тем по данным СМИ // Прикладная информатика. 2023. Т. 18. № 2. С. 73–84. DOI: 10.37791/2687-0649-2023-18-2-73-84