

Разработка цифровых двойников для производственных предприятий

В.Л. Макаров 

E-mail: makarov@cemi.rssi.ru

А.Р. Бахтизин 

E-mail: albert@cemi.rssi.ru

Г.Л. Бекларян 

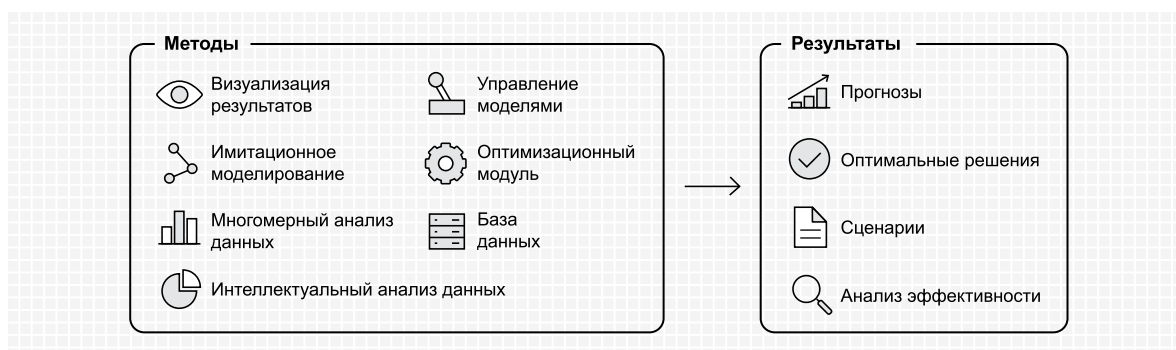
E-mail: glbeklaryan@gmail.com

Центральный экономико-математический институт, Российская академия наук
Адрес: 117418, г. Москва, Нахимовский проспект, д. 47

Аннотация

В статье представлен новый подход к разработке цифровых двойников производственных предприятий на основе методов имитационного моделирования. Описана концепция цифрового двойника как интегрированной системы, агрегирующей имитационные модели, базы данных, интеллектуальные программные модули класса генетических оптимизационных алгоритмов, подсистемы интеллектуального анализа данных (data mining) и др. Представлены примеры имитационных моделей различных производственных предприятий, в частности, типового сборочного цеха и типового добывающего предприятия. Первое предприятие осуществляет деятельность по сбору продукции из отдельных комплектующих со своими индивидуальными характеристиками. Для описания поведения подобного предприятия используются методы агентного и дискретно-событийного моделирования. Второе предприятие осуществляет добычу углеводородного сырья на имеющихся месторождениях с индивидуальными характеристиками. Разработанные укрупненные имитационные модели интегрированы с предметно-ориентированной базой данных и оптимизационными модулями, позволяющими управлять технологическими и ресурсными характеристиками соответствующих производственных предприятий. Разработка данных моделей была выполнена с использованием систем имитационного моделирования AnyLogic и Powersim, поддерживающих методы агентного моделирования и системной динамики. Продемонстрирована возможность создания цифровых двойников для производственных предприятий с использованием современных средств имитационного моделирования.

Графическая аннотация



Ключевые слова: цифровые двойники; агентное моделирование; системная динамика; дискретно-событийное моделирование; цифровая экономика; производственные предприятия.

Цитирование: Макаров В.Л., Бахтизин А.Р., Бекларян Г.Л. Разработка цифровых двойников для производственных предприятий // Бизнес-информатика. 2019. Т. 13. № 4. С. 7–16.
DOI: 10.17323/1998-0663.2019.4.7.16

Введение

В настоящее время в связи с переходом к цифровой экономике развивается новое научное направление, относящееся к созданию так называемых «цифровых двойников» – цифровых копий реальных физических объектов (например, производственных предприятий, финансовых корпораций и др.), помогающих оптимизировать эффективность всех ключевых процессов. Важнейшей характеристикой цифровых двойников является наличие некоторой виртуальной (компьютерной) модели и обеспечение ее поддержания в актуальном состоянии, главным образом, за счет механизма непрерывного обновления данных, используемых для оценки множественных характеристик исследуемого физического объекта.

Концепция цифровых двойников (digital twins) предложена относительно недавно [1, 2]. Тем не менее, исследователи отмечают, что проектирование цифровых двойников должно быть основано, в первую очередь, на использовании методов имитационного моделирования, обеспечивающих максимально реалистичное представление физического объекта в виртуальном мире [3]. При этом компьютерная модель должна поддерживать возможности решения задач по оптимизации множественных характеристик моделируемого объекта с использованием данных, обновляемых в режиме реального времени. Подобный подход применим ко многим объектам живой и неживой природы. Известны примеры разработки имитационных моделей для моделирования сложных социально-экономических систем [4, 5], вертикально-интегрированных нефтяных компаний и финансовых корпораций [6], эколого-экономических систем [7, 8], моделирования поведения толпы при чрезвычайных ситуациях [9, 10] и др. При этом используются различные методы имитационного моделирования, в частности, методы системной динамики, агентного и дискретно-событийного моделирования, поддерживаемые в системах Powersim, AnyLogic и др. [6].

Существенный вклад в развитие методов системной динамики сделан в работах [11–16]. Среди тру-

дов по агентному моделированию следует выделить работы [17–20]. Важные исследования в области дискретно-событийного моделирования представлены в работах [21, 22].

Особенностью современных систем имитационного моделирования является возможность интеграции разрабатываемых моделей с базами данных и хранилищами данных (например, MS SQL Server, Oracle, SAP HANA), а также возможность интеграции с внешними программными модулями, как правило, посредством специального API (application programming interface). Например, имитационные модели, создаваемые в AnyLogic и написанные на языке программирования Java, могут быть интегрированы с приложениями, разработанными на C++ и использующими MPI (message passing interface) для распараллеливания соответствующих вычислительных процедур. В результате можно агрегировать имитационные модели с генетическими оптимизационными алгоритмами по целевым функционалам, что дает возможность оптимизации характеристик моделируемого объекта в режиме реального времени [23–25]. Для обеспечения программного управления имеющимся пулом цифровых двойников возможно использование подхода на основе сервисно-ориентированной архитектуры (service-oriented architecture, SOA).

Цель данной статьи – разработка подхода к проектированию цифровых двойников для различных производственных предприятий с использованием методов имитационного моделирования, баз данных, оптимизационных модулей и др. для реализации концепции рационального управления производством в режиме реального времени и поддержки принятия стратегических и оперативных решений.

1. Концепция создания цифровых двойников

Предлагаемая концепция создания цифровых двойников основана на использовании интегрированного подхода, объединяющего методы имитационного моделирования, оптимизационные моду-

ли (класса генетических алгоритмов), базу данных (хранилище данных), подсистему многомерного анализа данных класса (online analytical processing, OLAP) и др. (рисунки 1).

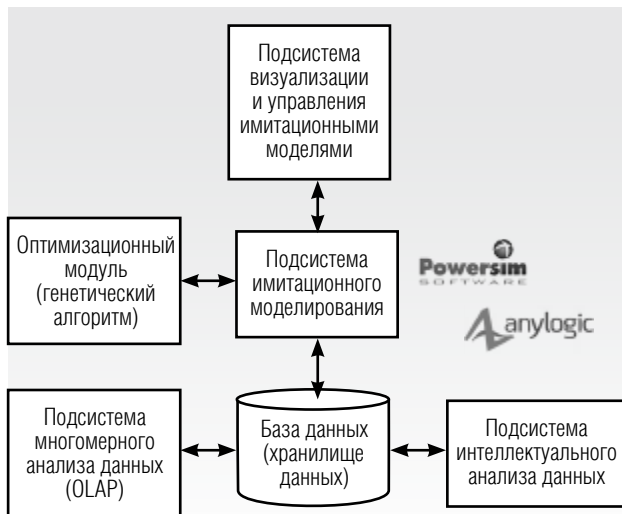


Рис. 1. Укрупненная системная архитектура цифрового двойника производственного предприятия

Важной особенностью предложенного подхода является обеспечение бесшовной интеграции рассматриваемых подсистем с поддержкой механизма функционирования всех программных модулей в режиме реального времени.

Таким образом, предлагается следующий состав взаимодействующих подсистем:

♦ **подсистема имитационного моделирования**, предназначенная для вычисления значений множественных характеристик предприятия при заданных сценарных условиях;

♦ **оптимизационный модуль**, агрегированный по целевым функционалам с имитационными моделями предприятия и обеспечивающий возможность формирования наилучших (рациональных, субоптимальных) управленческих решений при имеющихся ограничениях;

♦ **база данных (хранилище данных)**, обеспечивающая сбор и обработку актуальных данных по предприятию, а также предоставление исходных данных для имитационных моделей и хранение результатов моделирования;

♦ **подсистема визуализации и управления имитационными моделями**, интегрированная с имитационными моделями предприятия (посредством специального API, либо с использованием технологий

веб-сервисов – SOA) и позволяющая обращаться к различным функциям имитационных моделей, например, чтобы инициировать выполнение оптимизационных экспериментов, сохранение результатов сценарного моделирования в базу данных и др.;

♦ **подсистема многомерного анализа данных (OLAP)**, позволяющая анализировать результаты моделирования и оптимизации с различной степенью детализации и агрегации соответствующих данных (например, по предприятию в целом, по отдельным бизнес-направлениям, продуктам, клиентам и т.д.);

♦ **подсистема интеллектуального анализа данных**, обеспечивающая анализ взаимосвязей между важнейшими характеристиками информационной модели предприятия и актуализацию значений всех влияющих факторов и коэффициентов значимости с последующим сохранением результатов в базу данных системы. Подобный подход обеспечивает непрерывную актуализацию имеющихся взаимозависимостей в имитационных моделях предприятия.

Далее будут рассмотрены некоторые примеры имитационных моделей, разработанные для предприятий различного класса, в частности, типового сборочного цеха и типового добывающего предприятия.

2. Имитационная модель сборочного цеха

Рассмотрим укрупненную имитационную модель типового сборочного цеха, реализованную в системе AnyLogic (рисунки 2).

Данный сборочный цех производит некоторый продукт с использованием двух технологических линий. Первая производственная линия обеспечивает формирование промежуточного изделия с использованием пяти отдельных комплектующих, поставляемых в соответствии с заданным расписанием в систему сборки (элемент «Сборка 1»). Вторая производственная линия обеспечивает формирование конечного изделия (элемент «Сборка 2») с использованием двух комплектующих, одно из которых собрано на первой технологической линии.

В данной модели каждая продуктовая компонента (комплектующее) является агентом со своими индивидуальными характеристиками. Например, если это каркас изделия, то он имеет определенные размеры и другие заданные технические характе-

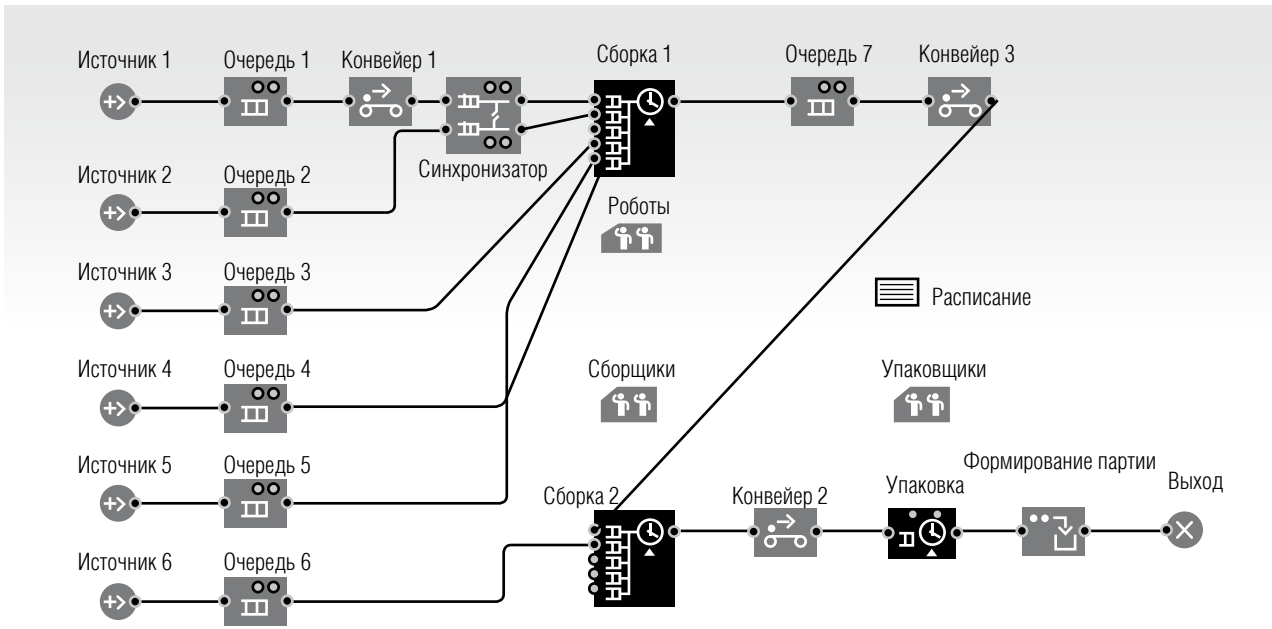


Рис. 2. Имитационная модель сборочного цеха в AnyLogic

ристики. На основе варьирования набора поступающих на вход модели агентов-комплектующих обеспечивается производство различных типов изделий на выходе системы (элемент «Выход»). При этом для комплектующих отдельных типов со своими индивидуальными характеристиками выполняется динамическая синхронизация с использованием специального элемента, обеспечивающего размещение агентов-комплектующих в очереди и нахождение пар агентов, удовлетворяющих заданному критерию соответствия (элемент «Синхрони-

затор»). В результате агенты-комплектующие, соответствующие некоторым заданным критериям, отправляются на сборку, при этом остальные агенты-комплектующие остаются в очереди, либо вытесняются из нее (на хранение).

Одним из возможных примеров анализа устойчивости производственного процесса с помощью разработанной имитационной модели является зависимость общего количества собираемых изделий от динамики поставок агентов-комплектующих (рисунок 3).

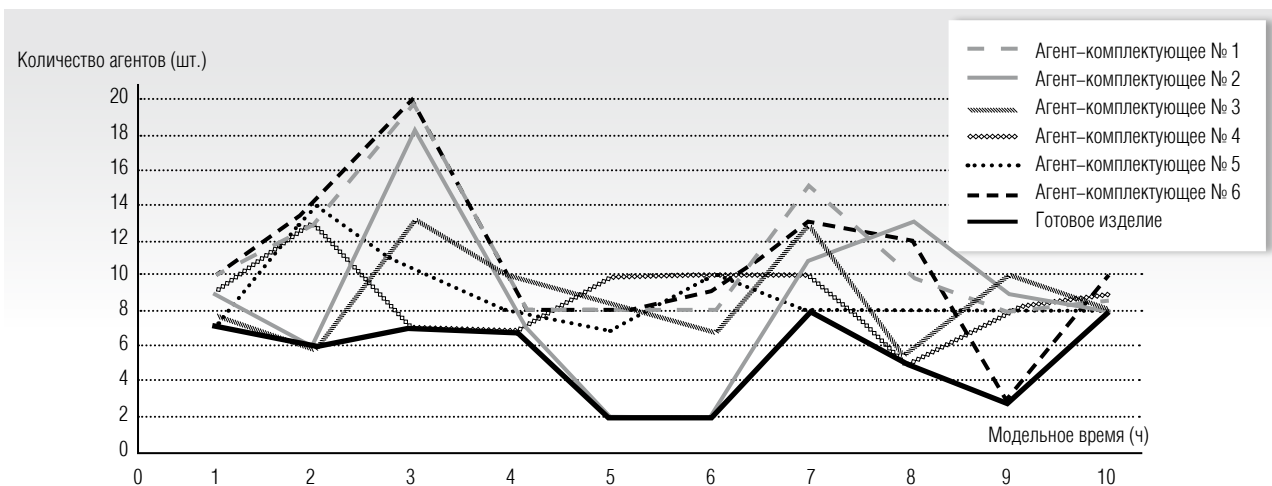


Рис. 3. Зависимость общего количества собираемых изделий от динамики поставок агентов-комплектующих

На *рисунке 3* видно, что в условиях количественного дефицита комплектующего № 2, возникающего на временном интервале с 5 до 6 часов, происходит сокращение темпов сборки готовой продукции до минимального уровня (двух изделий в час), равного значению темпа поставок самого дефицитного (второго) комплектующего.

Таким образом, скорость сборки конечной продукции ограничена темпами поставок наиболее дефицитного комплектующего, необходимого на соответствующем этапе сборки. Темпы сборки и поставки конечной продукции также существенно зависят от задействованных в соответствующих производственных процессах ресурсов (элементы «Роботы», «Сборщики», «Рабочие» на *рисунке 2*). В случае количественного дефицита ресурсов, необходимых для производства единицы продукции, время выполнения соответствующей задачи (сборки изделия) будет увеличено пропорционально значению коэффициента доступности соответствующего ресурса.

3. Имитационная модель добывающего предприятия

Далее рассмотрим укрупненную имитационную модель типового добывающего предприятия, реализованную в системе Powersim (*рисунк 4*).

В отличие от предыдущей дискретно-событийной агент-ориентированной модели сборочного цеха, данная модель оперирует непрерывными сырьевыми и финансовыми потоками и поэтому разрабатывается с использованием методов системной динамики [6]. При этом важными ресурсными характеристиками являются основные фонды предприятия, в частности, новый фонд скважин и старый фонд скважин, дифференцируемые по месторождениям. Переход скважин из нового фонда в старый осуществляется по истечении некоторого временного интервала (как правило, пяти лет), с соответствующим изменением объема добычи, что отражено в производственной функции, учитыва-

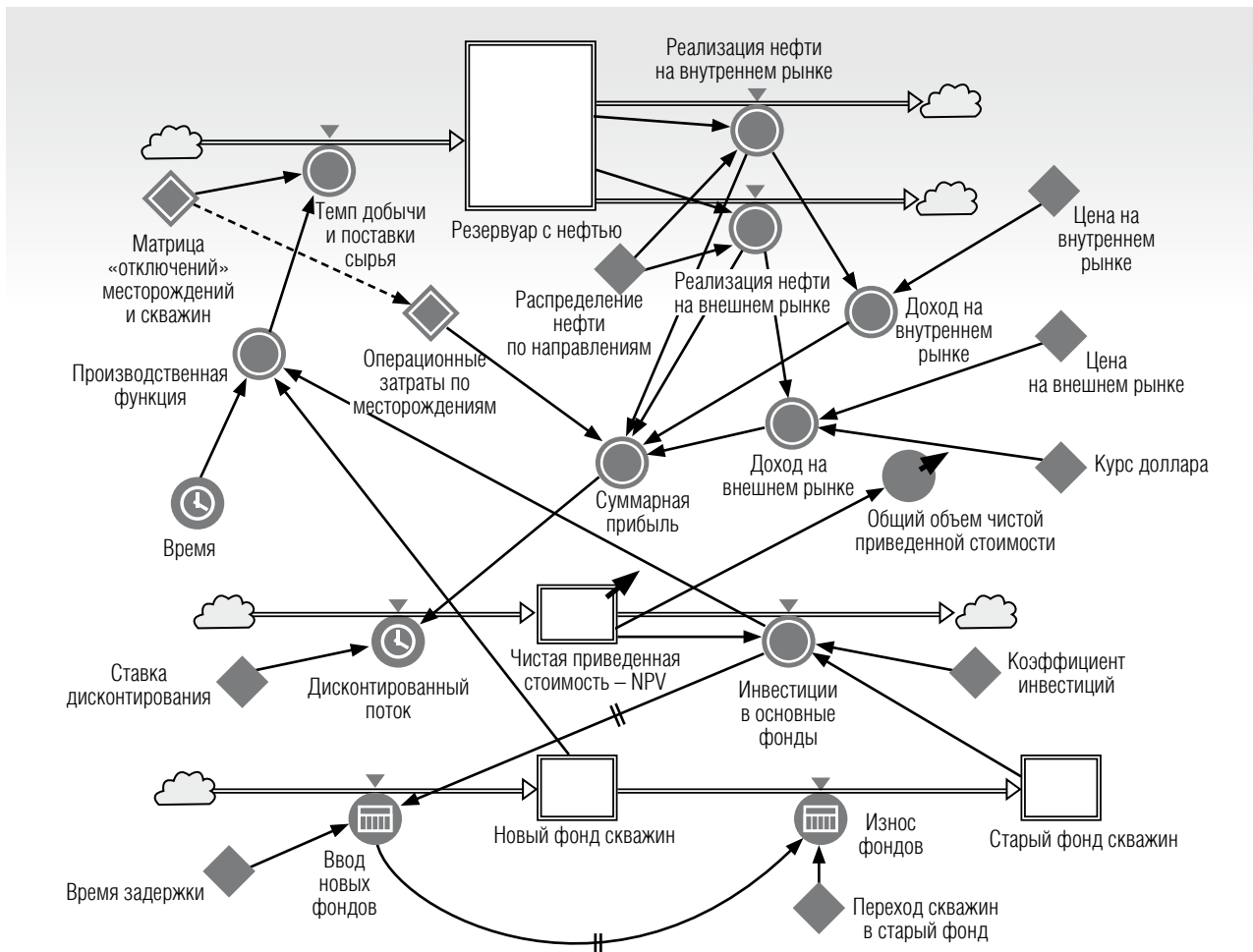


Рис. 4. Имитационная модель добывающего предприятия в Powersim

ющей различный вклад новых и старых скважин соответственно.

В свою очередь, показатели экономической эффективности эксплуатируемых месторождений и скважин зависят не только от объема добываемого сырья, но также от операционных и инвестиционных затрат, дифференцируемых по соответствующим месторождениям. В случае, если некоторое месторождение в определенный момент времени не эксплуатируется (например, вследствие приостановки соответствующих скважин), то по нему перестают формироваться материальные и финансовые потоки, а также доходные и расходные характеристики. Приведем наиболее важные соотношения предложенной модели.

Введем следующие обозначения:

♦ $t = 1, 2, \dots, T$ – модельное время (по годам), T – горизонт стратегического планирования;

♦ $i = 1, 2, \dots, I$ – индексы месторождений, I – максимальное количество имеющихся месторождений;

♦ $a_i(t)$ – количество новых скважин (основные фонды добывающего предприятия) на i -м месторождении ($i = 1, 2, \dots, I$) в момент времени t ($t = 1, 2, \dots, T$);

♦ $\{b_i(t), b_i(1)\}$ – количество старых скважин на i -м месторождении ($i = 1, 2, \dots, I$) в момент времени t ($t = 1, 2, \dots, T$) и исходное количество старых скважин в начальный момент времени $t = 1$;

♦ $\chi_i(t) \in \{0, 1\}$ – матрица «отключений» i -х месторождений ($i = 1, 2, \dots, I$) в момент времени t ($t = 1, 2, \dots, T$): при $\chi_i(t) = 0$ i -е месторождение не эксплуатируется, при $\chi_i(t) = 1$ i -ое месторождение эксплуатируется;

♦ $c_i(t)$ – темп добычи и поставки сырья (тонн в сутки) от i -го месторождения ($i = 1, 2, \dots, I$) в момент времени t ($t = 1, 2, \dots, T$);

♦ μ – коэффициент падения добычи для старых скважин;

♦ $\{v(t), \tilde{v}(t)\}$ – среднегодовой объем добычи на новых и старых скважинах соответственно в момент времени t ($t = 1, 2, \dots, T$);

♦ $\{p_1(t), p_2(1)\}$ – цена поставляемого сырья на внутреннем и внешнем рынках соответственно в момент времени t ($t = 1, 2, \dots, T$);

♦ $\{P_{1i}(t), P_{2i}(t)\}$ – выручка от реализации сырья по i -м месторождениям ($i = 1, 2, \dots, I$) на внутреннем и внешнем рынках соответственно в момент времени t ($t = 1, 2, \dots, T$);

♦ $\{\tilde{O}_i(t), \tilde{I}_i(t)\}$ – операционные и инвестиционные

расходы по i -м месторождениям ($i = 1, 2, \dots, I$) соответственно в момент времени t ($t = 1, 2, \dots, T$);

♦ $s(t)$ – курс доллара в момент времени t ($t = 1, 2, \dots, T$);

♦ $\lambda(t)$ – доля поставок нефти на внутренний рынок в момент времени t ($t = 1, 2, \dots, T$), $0 \leq \lambda(t) \leq 1$;

♦ τ – временной интервал, в течение которого скважины являются новыми (как правило, пять лет);

♦ r – ставка дисконтирования.

Количество новых и старых скважин соответственно:

$$a_i(t) = \sum_{t=1}^T (\tilde{a}_i(t) - \tilde{a}_i(t-\tau)), \quad (1)$$

$$b_i(t) = b_i(1) + \sum_{t=1}^T \tilde{a}_i(t-\tau), \quad (2)$$

$$i = 1, 2, \dots, I; t = 1, 2, \dots, T.$$

Темп добычи (поставки) сырья:

$$c_i(t) = \chi_i(t) (a_i(t)v(t) + b_i(t)\tilde{v}(t)e^{-\mu t}), \quad (3)$$

$$i = 1, 2, \dots, I; t = 1, 2, \dots, T.$$

Выручка от реализации сырья на внутреннем и внешнем рынке соответственно:

$$P_{1i}(t) = p_1(t)c_i(t)\lambda(t), \quad (4)$$

$$P_{2i}(t) = p_2(t)s(t)c_i(t)(1-\lambda(t)), \quad (5)$$

$$i = 1, 2, \dots, I; t = 1, 2, \dots, T.$$

Прибыль добывающего предприятия:

$$\pi_i(t) = P_{1i}(t) + P_{2i}(t) - \chi_i(t)\tilde{O}_i(t), \quad (6)$$

$$i = 1, 2, \dots, I; t = 1, 2, \dots, T.$$

Дисконтированный денежный поток добывающего предприятия:

$$DCF_i(t) = \frac{\pi_i(t) - \chi_i(t)\tilde{I}_i(t)}{(1+r)^t}. \quad (7)$$

Чистый накопленный дисконтированный финансовый поток добывающего предприятия и суммарный финансовый поток по всем месторождениям соответственно:

$$NPV_i = \sum_{t=1}^T DCF_i(t), \quad (8)$$

$$NPV^* = \sum_{i=1}^I NPV_i. \quad (9)$$

Отметим, что для прогнозирования динамики среднегодового объема добычи (дебита) на новых и старых скважинах $\{v(t), \bar{v}(t)\}$, влияющей на темп добычи и поставки сырья (3), в настоящее время применяются методы интеллектуального анализа данных, в частности, искусственные нейронные сети (ИНС). Подобная ИНС оценивает множественные входные характеристики (например, уровень запасов, данные о фактически проведенных и плановых геолого-технических мероприятиях, выбранную технологию добычи и др.) для прогнозирования среднегодового дебита скважин. Таким образом, значения наиболее важных базовых характеристик предложенной имитационной модели обновляются в режиме реального времени с учетом физических особенностей эксплуатируемых месторождений.

Одним из возможных примеров анализа эффективности портфеля инвестиционных проектов по набору (портфелю) эксплуатируемых месторождений является зависимость дисконтированного финансового потока $DCF_i(t)$ от значений элементов матрицы «отключений» месторождений $\chi_i(t) \in \{0, 1\}$ ($i = 1, 2, \dots, I$) (рисунок 5).

На рисунке 5 видно, что «отключение» второго месторождения приводит к двукратному увеличению суммарного финансового потока (по всем месторождениям) – NPV^* . Подобный положительный эффект обусловлен тем, что уровень операционных затрат по второму месторождению (на единицу продукции)

существенно превышает уровень затрат по другим месторождениям при сопоставимом уровне добычи. Тем не менее, если имеется жесткое ограничение на минимально необходимый суммарный объем добычи и поставок сырья, то исключение второго месторождения из эксплуатации невозможно. При этом, если количество одновременно оцениваемых сырьевых активов достаточно велико (например, несколько тысяч), то для выявления и «отключения» подобных месторождений следует применять генетические оптимизационные алгоритмы [23–25], агрегируемые с имитационной моделью предприятия.

Заключение

В статье представлен новый подход к разработке цифровых двойников для производственных предприятий, в основе которого лежит концепция бесшовной интеграции ряда ключевых подсистем, в частности, подсистемы имитационного моделирования, оптимизационного модуля, базы данных, подсистемы интеллектуального анализа данных и др. Важной особенностью цифровых двойников является актуализация исходных данных и значений влияющих параметров в режиме реального времени. Таким образом, цифровые двойники существенно расширяют функциональность традиционных имитационных моделей предприятия, в основном, за счет большей реалистичности и интерактивности соответствующей технологии.

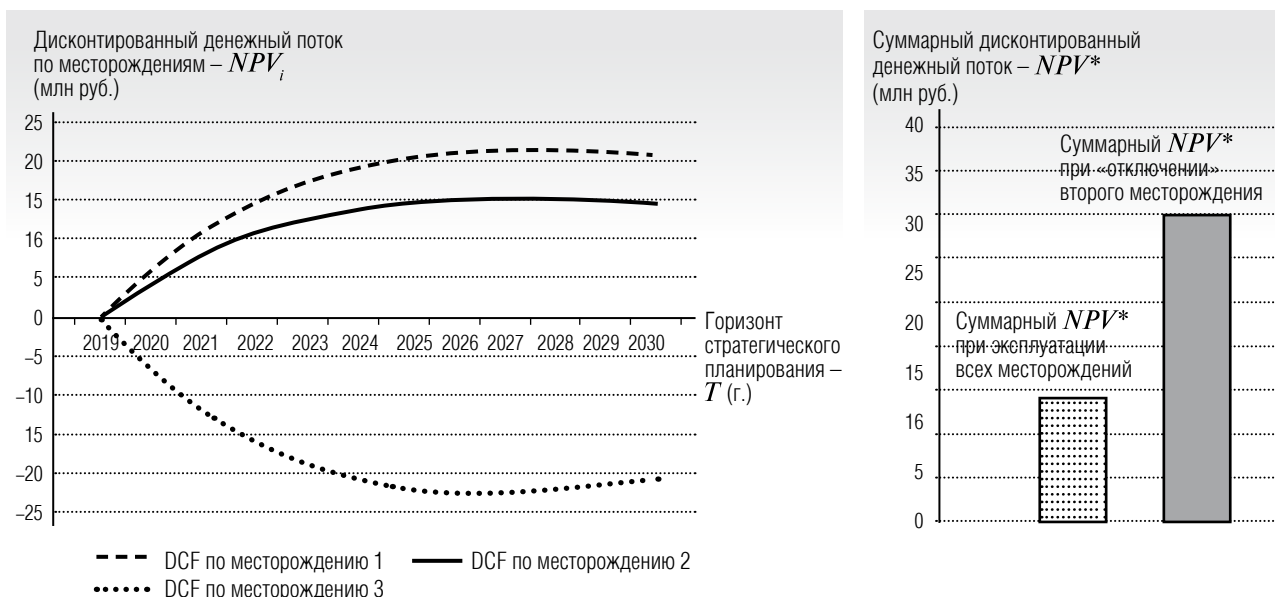


Рис. 5. Зависимость дисконтированного финансового потока от значений элементов матрицы «отключений» месторождений

Представлены примеры цифровых двойников, разработанных для производственных предприятий различных типов, в частности, типового сборочного цеха и типового добывающего предприятия. Первая модель, в частности, позволяет исследовать зависимость общего количества собираемых изделий от динамики поставок комплектующих с учетом их индивидуальных характеристик. Вторая модель позволяет оценивать влияние матрицы «отключений» месторождений на динамику дисконтированного финансового потока. Показано, что в условиях отсутствия жестких ограничений на минимально необходимый суммарный объем добычи сырья (план по добыче), возможно существенное увеличение чистой приведенной стоимости по портфелю месторождений за счет исключения из эксплуатации малодобитных скважин и месторождений с относительно высоким уровнем операционных затрат.

Если необходима оценка влияния множественных управляющих параметров (например, моделируются тысячи месторождений и скважин, сотни комплектующих, десятки производственных линий и т.д.), то возможно применение специальных оптимизационных модулей, агрегированных с имитационными моделями по целевым функционалам. Подобный интегрированный подход является наиболее перспективным в части развития концепции цифровых двойников и может быть использован в дальнейшем на более детализированном уровне. ■

Благодарности

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (РФФИ), в рамках научного проекта № 18-29-03139.

Литература

1. Saddik A.E. Digital twins: the convergence of multimedia technologies // IEEE MultiMedia. 2018. Vol. 25. No 2. P. 87–92.
2. Yan X., Yanming S., Xiaolong L., Yonghua Z. A digital-twin-assisted fault diagnosis using deep transfer learning // IEEE Access. 2019. Vol. 7. P. 19990–19999. DOI: 10.1109/ACCESS.2018.2890566.
3. An architecture of an intelligent digital twin in a cyber-physical production system / B.A. Talkhestani [et al.] // Automatisierungstechnik. 2019. Vol. 67. No 9. P. 762–782. DOI: 10.1515/auto-2019-0039.
4. Макаров В.Л., Бахтизин А.Р., Бекларян Г.Л., Акопов А.С. Разработка программной платформы для крупномасштабного агент-ориентированного моделирования сложных социальных систем // Программная инженерия. 2019. Т. 10. № 4. С. 167–177. DOI: 10.17587/prin.10.167-177.
5. Укрупненная агент-ориентированная имитационная модель миграционных потоков стран Европейского Союза / В.Л. Макаров и [др.] // Экономика и математические методы. 2019. Т. 55. № 1. С. 3–15. DOI: 10.31857/S042473880004044-7.
6. Акопов А.С. Имитационное моделирование. М.: Юрайт, 2017.
7. Akopov A.S., Beklaryan L.A., Saghatlyan A.K. Agent-based modelling of interactions between air pollutants and greenery using a case study of Yerevan, Armenia // Environmental Modelling and Software. 2019. Vol. 116. P. 7–25. DOI: 10.1016/j.envsoft.2019.02.003.
8. Akopov A.S., Beklaryan L.A., Saghatlyan A.K. Agent-based modelling for ecological economics: A case study of the Republic of Armenia // Ecological Modelling. 2017. Vol. 346. P. 99–118. DOI: 10.1016/j.ecolmodel.2016.11.012.
9. Akopov A.S., Beklaryan L.A. An agent model of crowd behavior in emergencies // Automation and Remote Control. 2015. Vol. 76. No 10. P. 1817–1827. DOI: 10.1134/S0005117915100094.
10. Beklaryan A.L., Akopov A.S. Simulation of agent-rescuer behaviour in emergency based on modified fuzzy clustering // Proceedings of the 2016 International Conference on Autonomous Agents & Multiagent Systems (AAMAS 2016). Singapore, 9–13 May 2016. P. 1275–1276.
11. Forrester J. Urban dynamics. Waltham, MT, USA: Pegasus Communications, 1969.
12. Forrester J. Industrial dynamics: A major breakthrough for decision makers // Harvard Business Review. 1959. Vol. 36. No 4. P. 37–66.
13. Meadows D.H., Randers J. Meadows D.L. Limits to growth: The 30-year update. London: Earthscan, 2005.
14. Meadows D.H. Limits to growth: A report for the Club of Rome's project on the predicament of mankind. New York: Universe Books, 1972.
15. Сидоренко В.Н. Системная динамика. М.: МГУ, ТЕИС, 1998.
16. Акопов А.С., Хачатрян Н.К. Системная динамика. М.: ЦЭМИ РАН, 2014.
17. Schelling T.C. Dynamic models of segregation // Journal of Mathematical Sociology. 1971. Vol. 1. No 2. P. 143–186.
18. Axelrod R. The complexity of cooperation: Agent-based models of competition and collaboration. Princeton: Princeton University Press, 1997.
19. Бахтизин А.Р. Агент-ориентированные модели экономики. М.: Экономика, 2008.
20. Акопов А.С., Хачатрян Н.К. Агентное моделирование. М.: ЦЭМИ РАН, 2016.
21. MacDougall M.H. Simulating computer systems: Techniques and tools. MIT Press, 1987.
22. Delaney W., Vaccari E. Dynamic models and discrete event simulation. New York: Marcel Dekker, 1989.
23. Akopov A.S., Beklaryan L.A., Thakur M., Verma B.D. Parallel multi-agent real-coded genetic algorithm for large-scale black-box single-objective optimisation // Knowledge-Based Systems. 2019. Vol. 174. P. 103–122. DOI: 10.1016/j.knsys.2019.03.003.
24. Акопов А.С., Бекларян А.Л., Тхакур М., Верма Б.Д. Разработка параллельных генетических алгоритмов вещественного кодирования для систем поддержки принятия решений социально-экономического и экологического планирования // Бизнес-информатика. 2019. Т. 13. № 1. С. 33–44. DOI: 10.17323/1998-0663.2019.1.33.44.
25. Beklaryan G.L., Akopov A.S., Khachatryan N.K. Optimisation of system dynamics models using a real-coded genetic algorithm with fuzzy control // Cybernetics and Information Technologies. 2019. Vol. 19. No 2. P. 87–103. DOI: 10.2478/cait-2019-0017.