

# Дискретно-событийное моделирование для системы метро

О.Н. Покусаев, Д.Е. Намиот, А.Е. Чекмарев

**Аннотация**— В данной статье рассматривается система дискретно-событийного моделирования для пассажирских потоков метро. Вместо разыгрывания (эмуляции) входных потоков данных предлагается использовать имеющуюся историческую информацию о пассажиропотоках метро, которая представлена в форме так называемых матриц корреспонденции. Предложенная модель может использовать собранные данные о пассажирских потоках для прогнозирования текущей загрузки транспортной системы. Также такого рода модель может быть использована как основа для построения цифрового двойника системы пассажиропотока в метрополитене. Такой двойник будет показывать текущую загрузку системы в произвольный момент времени. Модель поддерживает легкое масштабирование и расширение. В статье рассматривается моделирование для системы метрополитена, но точно такая же схема может быть использована как для системы городских железных дорог, так и для пригородного железнодорожного движения. В качестве одной из моделей применения может быть указана организация управления транспортной системой в критических ситуациях.

**Ключевые слова**— дискретно-событийное моделирование, цифровые близнецы.

## I. ВВЕДЕНИЕ

В данной статье рассматриваются вопросы построения цифрового двойника для системы метро. В качестве примера было выбрано московское метро, для которого имелся набор исторических данных, на которых и проверялась выдвинутая идея.

В цифровой экономике, цифровые технологии становятся основой ведения деятельности компаний [1]. С точки зрения транспортных систем это означает, что именно цифровые технологии лежат в основе систем управления транспортом. Классический пример – современные системы такси. Суть бизнес процессов не изменилась – прием заказов и подача машин заказчику, но вместо диспетчеров на телефоне появились цифровые платформы, которые не только изменили существовавшие процессы, но и позволили ввести новые модели использования, а также новые бизнес-модели. Это, естественно, касается и железнодорожного транспорта [2]. Все это – многократно описанные примеры так называемой цифровой трансформации [3].

Цифровой двойник, согласно классическому определению, представляет собой цифровую копию некоторого объекта [4]. Такой объект может быть живым или искусственным, сути дела это не меняет. Термин описывает цифровую копию реальных физических активов, а также процессов, людей, мест, систем и устройств. Цифровые двойники призваны облегчать средства контроля, понимания и оптимизации функций физические активов, обеспечивая беспрепятственную передачу данных между физическим и виртуальным миром [5]. Можно сказать, что цифровые двойники как раз и используют результаты цифровой трансформации – коль скоро процессы стали цифровыми, то они имеют, естественно, цифровое измерение. Например, в работе [6] описано, как инфраструктура цифровой железной дороги используется для систем IoT. Вот эти измерения цифровых процессов и используются в цифровых двойниках. Технология цифровых двойников играет решающую роль в Индустрии 4.0, обеспечивая единое представление реального и виртуального миров.

Соответственно, цифровой двойник должен по определению включать в себя имитационную модель [4]. Что также означает, что средства для разработки имитационных моделей могут быть использованы и при создании цифровых двойников. Собственно говоря, имитационное моделирование и представляет собой процесс создания и анализа цифрового прототипа некоторой физической модели. И основная цель этого прототипа – это как раз прогнозирование поведения (оценка характеристик) физической модели. ее характеристик в реальном мире.

В чем состоит отличие имитационной модели от цифрового двойника? Это отличие заключается в характере обрабатываемых данных. Цифровой двойник можно представить себе как моделирование в реальном времени. Классические имитационные модели выполняются в виртуальных средах. Данные для моделирования “похожи” на реальные, но генерируются искусственно. Двойники же объединяют данные в реальном времени. Для двойников характерна именно постоянная передача информации между цифровым двойником и соответствующей физической средой, что обеспечивает возможность выполнения имитационного моделирования в реальном времени. Естественно, что такой подход не только повышает точность прогнозных

Статья получена 10 апреля 2021 года.

Д.Е. Намиот - МГУ имени М.В. Ломоносова; РУТ (МИИТ) (e-mail: dnamiot@gmail.com)

О.Н. Покусаев – РУТ (МИИТ); РОАТ (e-mail: o.pokusaev@rut.digital).

А. Е. Чекмарев - РУТ (МИИТ) (email: a.chekmarev@rut.digital).

моделей, но и приводит к совершенно новому качеству аналитики и к новым возможностям мониторинга. Теперь это не типичный для систем имитационного мониторинга вопрос “что будет, если ...”, а стандартный для двойников вопрос “что происходит сейчас и что будет если ...”.

На рисунке 1 изображены типичные соединения и потоки данных цифрового двойника.

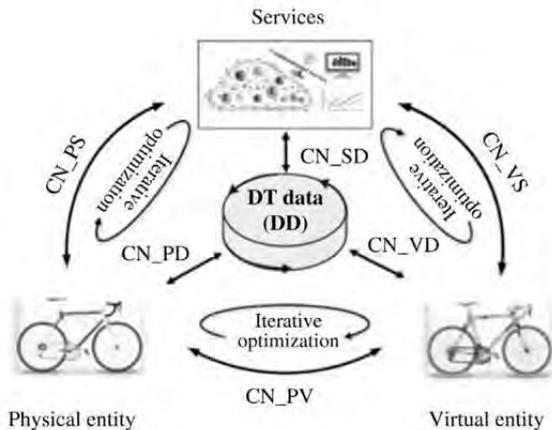


Рис. 1. Потоки данных цифрового двойника [7]

В настоящей статье описана система имитационного моделирования, которая является (может являться) основным элементом цифрового двойника.

Дальнейшая часть статьи организована следующим образом. В разделе II речь идет о системах дискретно-событийного моделирования. В разделе III речь идет собственно о предложенной модели и используемых данных. И раздел IV посвящен результатам моделирования.

## II. ДИСКРЕТНО-СОБЫТИЙНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И СИСТЕМЫ МЕТРО

Моделирование дискретных событий, как следует из названия, представляет собой форму компьютерного моделирования системы с помощью дискретной последовательности событий. Термин «дискретный» в данном случае описывает тот факт, что события развиваются во времени через определяемые в модели интервалы. Собственно моделирование предназначено для отслеживания эволюции системы во времени. Это достигается с помощью так называемых системных (имитационных) часов, которые меняются в зависимости от возникновения событий.

Классически, [8] схемы использования имитационных часов (модельного времени) подразделяются на следующие типы:

1) Определение времени следующего события (NETA - Next Event Time Advances). NETA - это механизм, определяющий время наступления будущих событий на основе некоторого списка. При этом типичном подходе модельное время устанавливается в нулевое значение, а далее обновляется по мере наступления событий. При

этом между последовательными событиями не должно происходить никаких изменений в системе. Все изменения состояний привязаны только к событиям. Отсюда, собственно говоря, и происходит название подхода – “событийный”.

2) Увеличение времени с помощью некоторого фиксированного приращения (FITA - Fixed Increment Time Advances). Этот альтернативный подход просто продвигает системные часы на некоторое значение. После изменения системного времени определяются события, которые произошли за это время (время, прошедшее после последнего приращения). Согласно наступившим событиям обновляются внутренние переменные (состояния). После чего время снова продвигается.

Некоторые исследователи отмечают, что, в целом, NETA более широко используется в моделировании, чем FITA, из-за своей меньшей сложности [9]. С меньшей сложностью можно согласиться, но также необходимо отметить, что возможность (необходимость) использования того или иного подхода связана, естественно, с моделью самой системы. NETA – это чаще всего простые одноканальные системы массового обслуживания, где прямо разыгрывается время следующего события. Если же таких каналов (событий) несколько, то может оказаться весьма трудным делом выстроить их в одну цепочку (упорядочить по времени). А такое упорядочивание необходимо, потому что, как указывалось выше, не должно быть “событий внутри событий”. Также можно отметить, что если мы говорим о моделях в рамках цифровых двойников, то это скорее подход FITA. Модели для цифровых двойников более сложные, в реальных системах параллельно происходящие события – это, скорее, правило, а не исключение. Поэтому более простым, как раз, окажется подход продвижения модельного времени на некоторый фиксированный интервал (для двойника – это опрос состояния системы через некоторое фиксированное время) и обработка результатов событий, произошедших после последнего опроса.

Области применения дискретно-событийного подхода довольно широкие. Это происходит в силу простоты и достаточно высокой эффективности описания систем в виде набора состояний. Классические применения – это все, что может быть представлено как система массового обслуживания: сервисные предприятия, транспортные системы, логистика и складские операции.

Как пример использования такого подхода для метро можно упомянуть работу [10]. На рисунке 2 изображена базовая структура модели сети метро: В этом иллюстративном примере представлено 2 линии (белый и серый цвет). Каждая из линий состоит из нескольких логических станций ( $I_i$ ). Каждая логическая станция связана с другими логическими станциями посредством двух линий – прием и отправка пассажиров. Логические

станции привязаны к некоторому физическому расположению. Несколько логических станций могут разделять одно физическое расположение – так обозначаются пересадочные узлы.

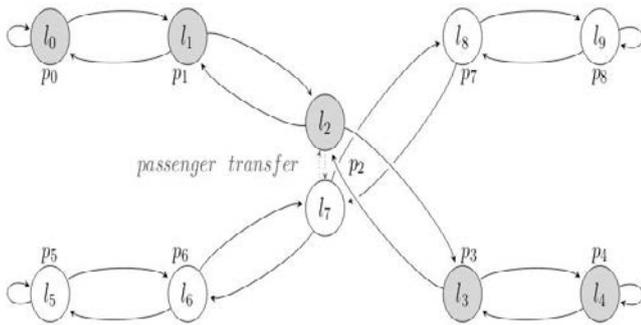


Рис. 2: Схематический пример двух пересекающихся линий [10].

Каждая индивидуальная поездка между двумя физическими станциями представляется как последовательность логических станций ( $l_1, l_2, l_3 \dots l_n$ )

В модели разыгрывается приход пассажиров на станцию (Пуассоновский процесс) и выбор ими маршрута движения. Далее, исходя из длительности перегонов, и определяется время появления пассажира на конкретной станции. Технически в такой модели можно легко ввести (учитывать) задержки, моделирующие время покидания станции на выходе и ожидания поезда на входе.

В работе [11] авторы рассматривают модель системы метрополитена с учетом движения поездов.

### III. МОДЕЛЬ ПОТОКОВ МЕТРО

Модель использует данные, которые собираются телекоммуникационными операторами. Поддержка мобильной связи в метро означает, что телефон абонента (пассажира) переключается на базовую станцию оператора, расположенную непосредственно в системе метрополитена в том момент, когда этот абонент входит в метро. Расположение базовой станции известно, и это позволяет определить станцию метро. Аналогично, когда пассажир покидает метро, обслуживание его телефона переключается с базовой станции в метро на наземную станцию. Соответственно, по расположению базовой станции можно определить и конечную станцию поездки.

Это означает, что даже в случае однократного предъявления проездных документов (использования транспортной карты) известна начальная и конечная станции поездки. Этот факт позволяет строить так называемые матрицы корреспонденции. В англоязычной литературе они называются OD (Origin – Destination) матрицы. Это квадратные матрицы, которые показывают количество пассажиров, отправляющихся от одной станции до другой за заданный временной интервал (например, 15 минут, 30 минут и т.д.)

При этом информация будет полностью анонимная,

никакая идентификация пассажира (абонента) не используется и не хранится. Агрегирование данных выполняется как раз для поддержки анонимности – в системе нет информации об индивидуальных траекториях. Набор матриц корреспонденций проиллюстрирован на рисунке 3.

Отметим, что поток пассажиров в городе является достаточно постоянным (рис.4). Напротив, именно изменения в таком потоке являются (могут служить) метрикой, которая и является свидетельством каких-то изменений в городе [12].

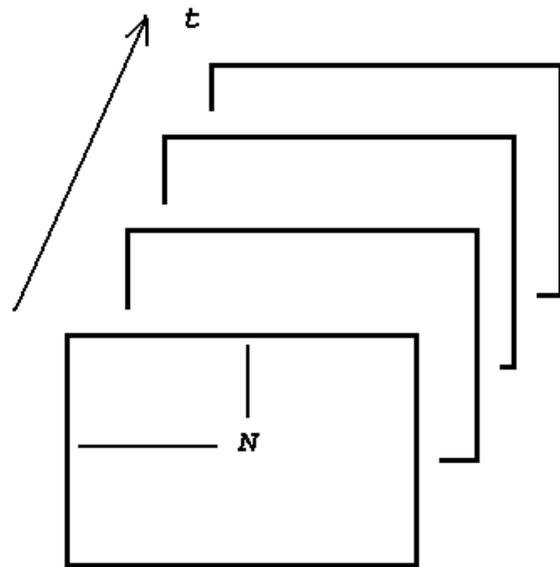


Рис. 3. Матрицы корреспонденции

Такие изменения могут быть временными (например, большой концерт вызовет пики по входу/выходу на близлежащих станциях) или свидетельством переключения на новую модель использования (например, перенос конечной станции пригородных автобусов окажет влияние на потоки пассажиров на затронутых станциях метро).

На рисунке 4 изображена интенсивность прихода пассажиров по часам в течение суток для разных станций метро. Интенсивность, естественно, различается от станции к станции, что отражает различие районов города, но для выбранной станции, например, интенсивность для заданного времени дня остается достаточно стабильной (рис. 5)

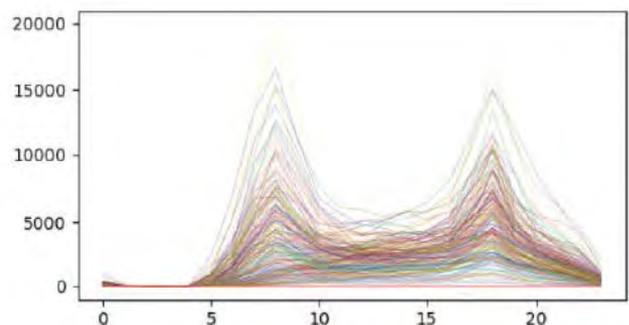


Рис. 4. Интенсивность прихода пассажиров [13].

Эти особенности позволяют нам предложить следующую модель для пассажирских потоков метро.

Пусть  $G(V, E)$  – ориентированный граф, описывающий систему метрополитена. Вершины соответствуют станциям, дуги – возможным перемещениям (пути и переходы между станциями).

Каждой дуге  $E$  мы можем сопоставить время, необходимое для перемещения по ней. Это либо длительность поездки между станциями дуги, либо время, потребное для перехода. Технически, информация о времени перемещения была собрана с помощью сервиса Яндекс.Метро.

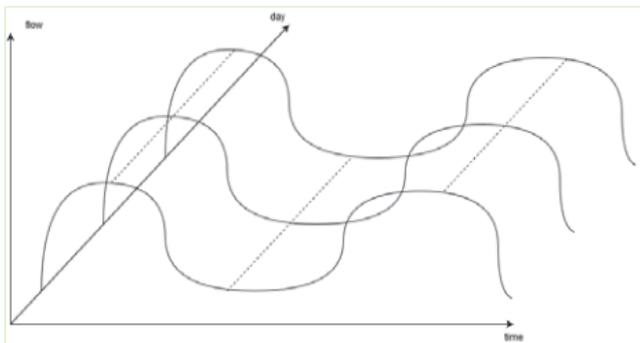


Рис. 5. Интенсивность (ось Y) для заданного времени (ось X) по дням (ось Z).

Поскольку матрицы корреспонденции существуют для небольших интервалов времени (например, 15 минут), то можно предположить, что указанное количество пассажиров прибывает на станцию равномерно в течение заданного интервала.

Мы предполагаем, что пассажиры всегда выбирают самый короткий по времени маршрут. Если таковых несколько, то выбирается маршрут с наименьшим количеством пересадок. Это означает, что для каждого значения в матрице корреспонденции мы знаем точный маршрут (последовательность станций и переходов). Поскольку времена перемещений известны, то в каждый момент времени для каждой группы пассажиров из матрицы корреспонденций известно, между какими станциями (на какой станции) своего маршрута находится эта группа.

Состояние системы – это местонахождение всех ее пассажиров, которые либо зашли на станцию (вошли в систему), либо перемещаются в системе между двумя конкретными станциями. Когда группа пассажиров появляется в системе (в соответствии с данными матрицы корреспонденции), мы можем сформировать ее вектор состояний (местонахождений) для всего маршрута, указывая смещение по времени от текущего (от времени входа). Соответственно состояние системы – это набор векторов местонахождений отдельных групп:

$$S = \langle N_i \rangle$$

$$\text{Где } N_i = \langle I_1(t+C_1), I_2(t+C_2), \dots, I_n(t+C_n) \rangle$$

Для каждой станции маршрута указывается время ее достижения как смещение по отношению к началу.

Модельное время продвигается равномерно с шагом 1 мин. То есть модель (двойник) пересчитывает состояние системы каждую минуту. При изменении состояния появляются новые маршруты (согласно матрице корреспонденций) и заканчиваются старые. Для незаконченных маршрутов (групп пассажиров) пересчитывается их текущее местоположение.

#### IV. РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Какую информацию можно получать из такой модели?

Практически, основную идею можно проиллюстрировать следующим изображением, полученным с помощью системы визуализации Kepler.gl [14]. Kepler.gl – это высокопроизводительное веб-приложение, разработанное компанией Uber и предназначенное для визуального исследования крупномасштабных наборов данных геолокации. Kepler.gl может отображать миллионы точек, представляющих тысячи поездок, и выполнять пространственное агрегирование на лету. Очевидно, что анализ данных о траекториях – сложная задача анализа пространственно-временных характеристик. Визуализация этих данных часто помогает в интуитивном анализе. Помимо этого, методы визуализации также могут использоваться для исправления ошибок в данных, для обнаружения взаимосвязи между многомерными атрибутами, для исследования временных и пространственных законов (правил), скрытых в данных.

Kepler.gl представляет довольно развитые средства визуализации транспортных данных, включая показ информации в динамике. На рисунке ниже изображен снимок экрана из динамического ролика, визуализирующего информацию из описанных выше матриц корреспонденции.



Рис. 6. Суточное количество отправок по станциям метро.

Это картинку можно описать как слепок текущего состояния транспортной системы метро с точки зрения нахождения в ней пассажиров: сколько и где их находится, а также, куда они направляются.

Такого рода данные можно представлять себе как основу того, что позволяет вычислять (представлять) предлагаемая имитационная модель (цифровой двойник). Поскольку цифровой двойник (его имитационная модель) работает с реальными данными, то результатом работы модели не является какое-то подтвержденное вычислительным экспериментом заключение (утверждение). Результат работы модели есть развернутое во времени изменение ее параметров. Применительно к данной модели – развернутое во времени изменение атрибутов дуг графа транспортной системы. Визуальное представление снимка (среза состояния) такой системы и было представлено на рисунке выше.

То, что модель (двойник) представляет собой динамическую систему, позволяет использовать его для оценки развития ситуации во временном интервале.

Вот, например, типичные вопросы, которые можно обращать к такой системе:

- Количество пассажиров, находящихся на конкретном перегоне
- Количество пассажиров на входе (на выходе) станции
- Количество пассажиров, которые направляются к конкретной станции (со всех направлений, с конкретного направления)
- Ожидаемая нагрузка пересадочного узла (узлов) для заданного временного интервала и так далее.

Подобного рода данные позволяют, например, оценивать качество обслуживания (комфортность пребывания) для пассажиров [15]. Переполнение транспортной системы ведет, например, к росту так называемой транспортной усталости.

Можно отметить, что одним из очевидных применений такой модели является управление в кризисных ситуациях. Например, при аварии на линии оценить количество затрагиваемых этим событием пассажиров и, соответственно, потребность в дополнительном наземном транспорте.

В представленной форме предложенная модель (цифровой двойник) автоматически адаптируется под сезонные сдвиги. Например, летом большое число жителей города живет на пригородных дачах, соответственно, поменяется и структура использования станций метро. Использование реальных данных для моделирования обеспечит автоматический учет этих изменений.

В предложенной форме, модель подходит и для работы с пассажирами городской железной дороги.

Исходные данные там, для московского региона, собираются на входных турникетах железнодорожных станций [16]. При этом структура использования проездных билетов такова, что пассажир должен предъявлять их дважды – при посадке (входе на станцию) и при высадке (выходе со станции). В терминах социальных сетей – это две отметки: check-in и check-out. Соответственно, при дискретно-событийном моделировании это позволяет оценивать количество пассажиров, которые в каждый конкретный момент времени находятся в поездах, а также иметь точную информацию о маршруте их следования.

## V. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящей статье рассмотрена дискретно-событийная имитационная модель пассажирского потока для системы метро. Предложенная модель может служить основой для цифрового двойника, который позволяет вести управление транспортной системой и поддерживать ее работы в кризисной ситуации. Модель поддерживает легкое масштабирование и расширение. Изначально описанная для системы метрополитена, модель может быть использована и для системы городских железных дорог, а также пригородного железнодорожного движения.

## БИБЛИОГРАФИЯ

- [1] Куприяновский В. П. и др. О работах по цифровой экономике //Современные информационные технологии и ИТ-образование. – 2016. – Т. 12. – №. 1. – С. 243-249.
- [2] Куприяновский В. П. и др. Цифровая железная дорога-прогнозы, инновации, проекты //International Journal of Open Information Technologies. – 2016. – Т. 4. – №. 9. – С. 34-43.
- [3] Соколов И. А. и др. Государство, инновации, наука и таланты в измерении цифровой экономики (на примере Великобритании) //International Journal of Open Information Technologies. – 2017. – Т. 5. – №. 6. – С. 33-48.
- [4] Намиот Д. Е. и др. Цифровые двойники и системы дискретно-событийного моделирования //International Journal of Open Information Technologies. – 2021. – Т. 9. – №. 2. – С. 70-75.
- [5] Khajavi, Siavash H., et al. "Digital twin: vision, benefits, boundaries, and creation for buildings." IEEE Access 7 (2019): 147406-147419.
- [6] Kupriyanovsky V. et al. On Internet of Digital Railway //International Journal of Open Information Technologies. – 2016. – Т. 4. – №. 12. – С. 53-68.
- [7] Tao, Fei, et al. "Digital twin driven prognostics and health management for complex equipment." Cirp Annals 67.1 (2018): 169-172.
- [8] Law, Averill M., W. David Kelton, and W. David Kelton. Simulation modeling and analysis. Vol. 3. New York: McGraw-Hill, 2000.
- [9] Tang, Jiangjun, George Leu, and Hussein A. Abbass. Simulation and Computational Red Teaming for Problem Solving. John Wiley & Sons, 2019.
- [10] Schmaranzer, David, Roland Braune, and Karl F. Doerner. "A discrete event simulation model of the Viennese subway system for decision support and strategic planning." 2016 Winter Simulation Conference (WSC). IEEE, 2016.
- [11] Li, Yang, et al. "Discrete-event simulations for metro train operation under emergencies: A multi-agent based model with parallel computing." Physica A: Statistical Mechanics and its Applications 573 (2021): 125964.
- [12] Bulygin M., Namiot D. A New Approach to Clustering Districts and Connections Between Them Based on Cellular Operator Data //2021 29th Conference of Open Innovations Association (FRUCT). – IEEE, 2021. – С. 71-80.
- [13] Nekraplonna, Mariia, and Dmitry Namiot. "Metro correspondence matrix analysis." International Journal of Open Information Technologies 7.7 (2019): 68-80.

- [14] Medvedenko S., Namiot D. Visual analysis of railway passenger traffic data //International Journal of Open Information Technologies. – 2021. – Т. 9. – №. 6. – С. 51-60.
- [15] Волков А. А., Намиот Д. Е., Шнепс-Шнеппе М. А. О задачах создания эффективной инфраструктуры среды обитания //International Journal of Open Information Technologies. – 2013. – Т. 1. – №. 7. – С. 1-10.
- [16] Misharin, A., D. Namiot, and O. Pokusaev. "On Passenger Flow Estimation for new Urban Railways." IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. Vol. 177. No. 1. IOP Publishing, 2018.

# Discrete Event Modeling for Metro System

Oleg Pokusaev, Dmitry Namiot, Alexander Chekmarev

**Abstract**— This article discusses a discrete-event modeling system for metro passenger flows. Instead of playing out (emulating) input data streams, it is proposed to use the available historical information about metro passenger traffic, which is presented in the form of so-called correspondence matrices. The proposed model can use the collected data on passenger flows to predict the current load of the transport system. Also, this kind of model can be used as a basis for building a digital twin of the passenger traffic system in the metro. Such a twin will show the current system load at an arbitrary point in time. The model supports easy scaling and expansion. The article discusses modeling for the subway system, but the exact same scheme can be used for both urban rail systems and commuter rail traffic. Organization of management of the transport system in critical situations can be indicated as one of the models of application.

**Keywords**—discrete event simulation, digital twins.

## REFERENCES

- [1] Kuprijanovskij V. P. i dr. O rabotah po cifrovoj jekonomike //Sovremennye informacionnye tehnologii i IT-obrazovanie. – 2016. – T. 12. – #. 1. – S. 243-249.
- [2] Kuprijanovskij V. P. i dr. Cifrovaja zheleznaja doroga-prognozy, innovacii, proekty //International Journal of Open Information Technologies. – 2016. – T. 4. – #. 9. – S. 34-43.
- [3] Sokolov I. A. i dr. Gosudarstvo, innovacii, nauka i talanty v izmerenii cifrovoj jekonomiki (na primere Velikobritanii) //International Journal of Open Information Technologies. – 2017. – T. 5. – #. 6. – S. 33-48.
- [4] Namiot D. E. i dr. Cifrovyje dvojniki i sistemy diskretno-sobytiynogo modelirovanija //International Journal of Open Information Technologies. – 2021. – T. 9. – #. 2. – S. 70-75.
- [5] Khajavi, Siavash H., et al. "Digital twin: vision, benefits, boundaries, and creation for buildings." IEEE Access 7 (2019): 147406-147419.
- [6] Kuprijanovsky V. et al. On Internet of Digital Railway //International Journal of Open Information Technologies. – 2016. – T. 4. – #. 12. – S. 53-68.
- [7] Tao, Fei, et al. "Digital twin driven prognostics and health management for complex equipment." Cirp Annals 67.1 (2018): 169-172.
- [8] Law, Averill M., W. David Kelton, and W. David Kelton. Simulation modeling and analysis. Vol. 3. New York: McGraw-Hill, 2000.
- [9] Tang, Jiangjun, George Leu, and Hussein A. Abbass. Simulation and Computational Red Teaming for Problem Solving. John Wiley & Sons, 2019.
- [10] Schmaranzer, David, Roland Braune, and Karl F. Doerner. "A discrete event simulation model of the Viennese subway system for decision support and strategic planning." 2016 Winter Simulation Conference (WSC). IEEE, 2016.
- [11] Li, Yang, et al. "Discrete-event simulations for metro train operation under emergencies: A multi-agent based model with parallel computing." Physica A: Statistical Mechanics and its Applications 573 (2021): 125964.
- [12] Bulygin M., Namiot D. A New Approach to Clustering Districts and Connections Between Them Based on Cellular Operator Data //2021 29th Conference of Open Innovations Association (FRUCT). – IEEE, 2021. – S. 71-80.
- [13] Nekraplonna, Mariia, and Dmitry Namiot. "Metro correspondence matrix analysis." International Journal of Open Information Technologies 7.7 (2019): 68-80.
- [14] Medvedenko S., Namiot D. Visual analysis of railway passenger traffic data //International Journal of Open Information Technologies. – 2021. – T. 9. – №. 6. – C. 51-60.
- [15] Volkov A. A., Namiot D. E., Shneps-Shneppe M. A. O zadachah sozdaniya jeffektivnoj infrastruktury sredi obitanija //International Journal of Open Information Technologies. – 2013. – T. 1. – #. 7. – S. 1-10.
- [16] Misharin, A., D. Namiot, and O. Pokusaev. "On Passenger Flow Estimation for new Urban Railways." IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. Vol. 177. No. 1. IOP Publishing, 2018.