



ИССЛЕДОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА МОДЕЛИ ЦИФРОВОГО ДВОЙНИКА ПРОЦЕССОВ ПО ИНТЕГРАЦИИ ВНУТРЕННИХ ВОДНЫХ ПУТЕЙ КАК ЭЛЕМЕНТА ОСНОВНОЙ ТРАНСПОРТНОЙ СИСТЕМЫ МЕГАПОЛИСА

В. Е. Таратун, Е. А. Таратун

Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения

В статье рассмотрен вопрос стандартизации информационных потоков подсистем транспортной системы мегаполиса. Представлена объектно-структурная модель передачи данных в транспортной системе. Разработаны и представлены алгоритмическая и цифровая модели, позволяющие оценить степень загруженности подсистем, а также выработать оптимальные сценарии работы.

Ключевые слова: транспортная система, информационный поток, повышение эффективности работы транспортной системы, цифровой двойник, имитационное моделирование, агентный подход.

Для цитирования:

Таратун, В. Е. Исследование и разработка модели цифрового двойника процессов по интеграции внутренних водных путей как элемента основной транспортной системы мегаполиса / В. Е. Таратун, Е. А. Таратун // Системный анализ и логистика. – 2023. – № 3(37). – с. 203 – 213. DOI: 10.31799/2077-5687-2023-3-203-213.

RESEARCH AND DEVELOPMENT OF A DIGITAL TWIN MODEL FOR THE INTEGRATION OF INLAND WATERWAYS AS AN ELEMENT OF THE MAIN TRANSPORT SYSTEM OF A MEGA CITY

V. E. Taratun, E. A. Taratun

St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation

The article discusses the issue of standardization of information flows of subsystems of the transport system of a metropolis. An object-structural model of data transmission in a transport system is presented. Algorithmic and digital models have been developed and presented to assess the degree of workload of subsystems, as well as to develop optimal operating scenarios.

Keywords: transport system, information flow, improving the efficiency of the transport system, digital twin, simulation modeling, agent approach.

For citation:

Taratun, V. E. Research and development of a digital twin model of processes for the integration of inland waterways as an element of the main transport system of a mega city / V. E. Taratun, E. A. Taratun // System analysis and logistics. – 2023. – № 3(37). – p. 203 – 213. DOI: 10.31799/2077-5687-2023-3-203-213.

Введение

Рассматривая транспортную систему мегаполиса с целью выработки решений по увеличению эффективности функционирования можно с уверенностью сказать, что данная задача является весьма комплексной и сложной ввиду наличия сложной структуры организации исследуемых подсистем.

Кроме того, важным аспектом, значительно влияющим на выработку оптимальных сценариев работы подсистем транспортной системы, является разрозненность информационных потоков и в связи с чем невозможность информационного их взаимодействия.

Транспортная система мегаполиса является классической системой массового обслуживания [1]. На сегодняшний день существует достаточно много методов и средств, позволяющих исследовать ту или иную подсистему с целью выявления проблемных мест в управлении и повышении эффективности ее функционирования. С системной точки зрения для повышения эффективности работы исследуемой системы требуется изучение ее методами анализа, и синтеза. Однако, недостаточность развития существующих моделей информационного взаимодействия подсистем данного класса порождает невозможность



применения методов синтеза и диктует необходимость разработки новых – более эффективных моделей для решения данной задачи.

В рамках исследования обслуживания пассажиропотока в транспортной системе мегаполиса и наличия разрозненности информационных потоков требуется разработка единой информационной модели пассажиропотока при взаимодействии подсистемы наземного городского пассажирского транспорта и внутреннего водного.

Объектно-структурная модель передачи данных в транспортной системе

Используем описание процессов перехода пассажиропотока из одного элемента в другой на основе логического подхода и используя метод объектно-структурного моделирования. При этом объектно-структурную модель представим на основании структурно-функциональной модели, которая будет представлять из себя ориентированный граф, узлы которого будут обозначать объекты (опорные элементы подсистем для обработки пассажиропотока) транспортной системы.

Так как объектно-структурная модель, которая представлена на рисунке 1 определена по информационному потоку, имеется отсутствие обратных связей и наличие атомарности транзакций в системе, то можно использовать для описания модели – линейные ориентированные деревья.

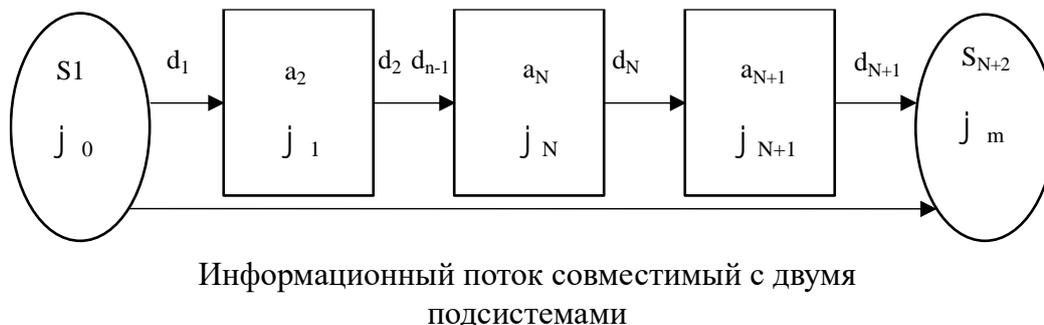


Рис. 1. Объектно-структурная модель

Представим модель в виде ордера:

$$O(S, A, D, \varphi),$$

где: $S = \{S_1, S_{N+2}\}$ – узлы, участвующие в формировании пассажиропотока для обработки в транспортной системе; $A = \{a_2, a_3, \dots, a_{N+1}\}$ – узлы, обозначающие промежуточные точки при обработке пассажиропотока; $D = \{d_1, d_2, \dots, d_{N+1}\}$ – дуги, обозначающие маршрут движения пассажиропотока и информационного потока; $\varphi = \{\varphi_0, \varphi_1, \dots, \varphi_m\}$ – элементы описывающие параметры пассажиров в логистической системе пассажиропотока.

Модель представляется в виде ряда упорядоченных массивов данных, задачей которых является определение подмножества значений показателей узлов и дуг ориентированного дерева.

Детализация и формальное представление объектно-структурной модели достигается за счет применения методологии агрегативного моделирования и кибернетического подхода.

Таким образом, каждый узел модели можно рассмотреть, как элементарное звено логистической цепи в виде кортежа:

$$A = \langle G, X, Y, f, Z \rangle,$$

где G – поток управления учётом (мониторинг перемещения пассажиров в системе); X, Y



– входной и выходной информационные потоки.

Структуры же данных потоков содержат информацию учётных данных (тип пассажира, дата/время перемещения, маршрут перемещения, количество и статус пассажиропотока, в котором находится пассажир и др.); f – некоторая функция, которая позволяет выполнить операцию преобразования информационных потоков, связанная с входным и выходным потоками, которая представляется в виде:

где Z – состояние элементарного звена логистической цепи, описываемое в виде кортежа:

$$Z = \langle PM, NT, CO, ST, KT, v \rangle,$$

где PM – определенная и конечная совокупность пассажиров в маршруте движения информационного потока; NT – конечное множество пассажиропотоков, которые связаны с определенными процессами при перемещении пассажиров через элементы обслуживания в системе; CO – определенная и конечная совокупность пассажиров, ожидающих обработки; ST – конечное множество статусов пассажиров; KT – конечное множество параметров системы, используемых в процессе учета пассажиров; v – дискретно-событийная функция, которая определяет состояние звена логистической цепи:

где Z_0 – начальное состояние пассажира.

Таким образом, при перемещении пассажиров в составе определенного и единого пассажиропотока G создает событие, которое в свою очередь требует изменение данных о пассажире. События, инициируемые потоками X и Y приводят к изменению определенной и конечной совокупности пассажиров, ожидающих обработки и/или статуса пассажиров в звене логистической цепи.

При этом, представленная модель при формировании информации $\varphi = \{ \varphi_0, \varphi_1, \dots, \varphi_m \}$ на каждом участке перемещения пассажиров должна быть отражена в алгоритмическом обеспечении, способствующим построению модели цифрового двойника для исключения разрозненности информационных потоков транспортных подсистем.

Практическая реализация алгоритмической и цифровой моделей для оценки загруженности транспортных подсистем мегаполиса

Для разработки модели цифрового двойника была разработана алгоритмическая модель, представленная на рисунке 2 и рисунке 3 соответственно.



Рис. 2. Алгоритмическая модель работы цифрового двойника по интеграции и взаимодействию внутренних элементов транспортной системы для решения задачи оценки загруженности с учетом наземной транспортной инфраструктуры

Алгоритмическая модель построена на основе разработанной объектно-структурной модели, которая позволяет за счет стандартизации и синтеза информационных потоков организовать как взаимодействие различных транспортных подсистем, а также определить зависимость процессов обслуживания пассажиропотока от внешней инфраструктуры города [2]. Алгоритмическая модель позволяет оценить и грамотно выстроить функциональную возможность работы цифрового двойника. Рассмотрим этапы выполнения алгоритмической модели более подробно.

На первом этапе модели происходит определение и создание внутренних параметров, необходимых как для реализации процессов перемещения пассажиров в транспортных подсистемах, так и накопления статистических данных для оценки результативности предложенных методов управления.

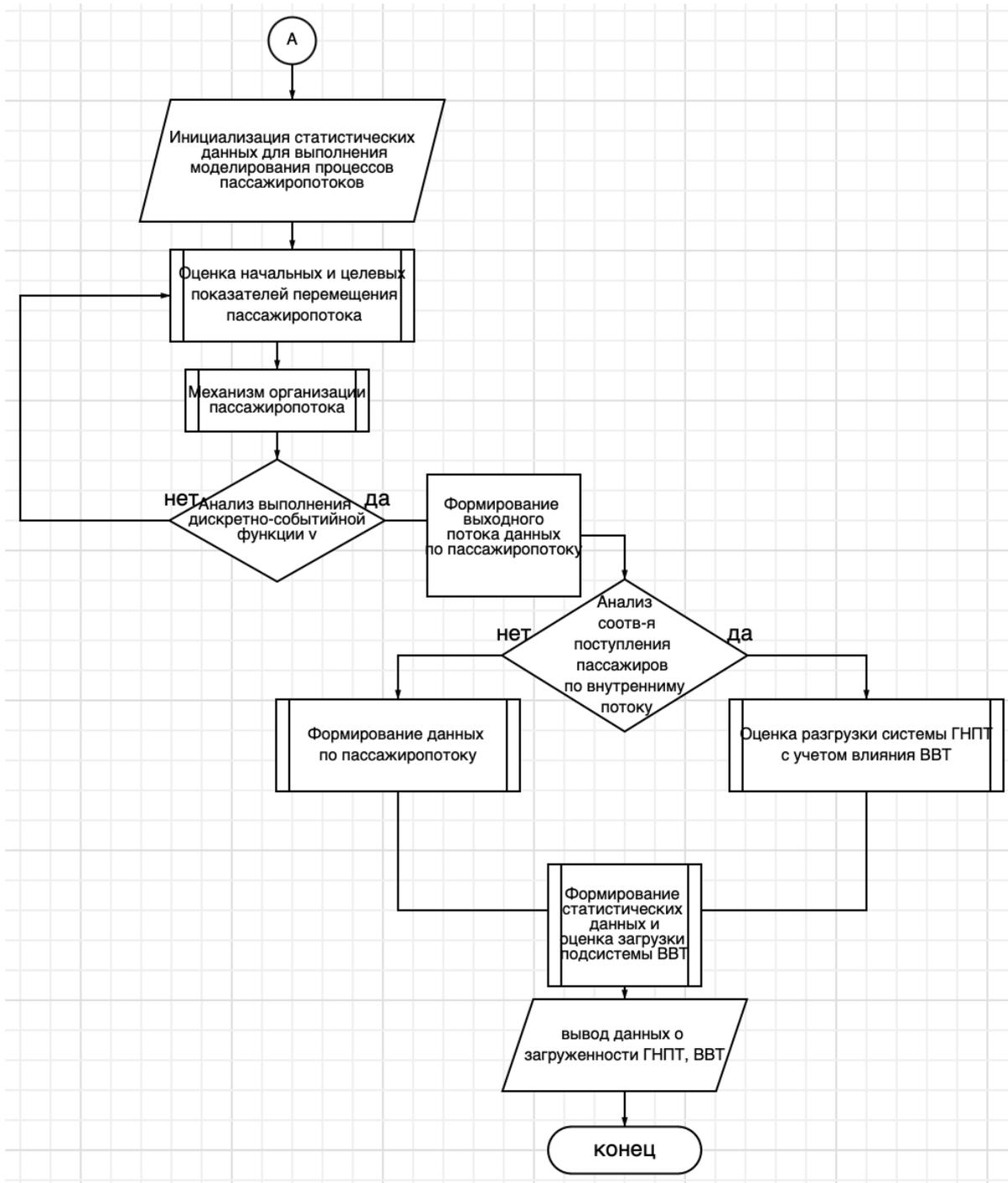


Рис. 3. Продолжение алгоритмической модели работы цифрового двойника по интеграции и взаимодействию внутренних элементов транспортной системы для решения задачи оценки загруженности с учетом наземной транспортной инфраструктуры

Далее происходит инициализация и создание основных узлов согласно объектно-структурной модели S_1, S_2, \dots, S_n и внутренних узлов обслуживания пассажиров a_2, a_3, \dots, a_n .

На этапе 2 происходит формирование процессов системы городского наземного пассажирского транспорта (далее – ГНПТ), а именно реализация системы перемещения наземного пассажирского транспорта, путем реализации дискретно-процессного метода моделирования. Аналогичным образом происходит формирование и реализация системы внутренних водных путей.



Этап 3 связан с формированием и инициализацией траекторий движения пассажиропотоков с учетом систем ГНПТ и внешней транспортной инфраструктуры. Именно данный этап позволяет выстроить внутренние переходные процессы из одной системы обслуживания пассажиров в другую, а также оценить взаимодействие системы внутреннего водного транспорта (далее – ВВТ) с внешней инфраструктурой мегаполиса.

Этап 4. Данный этап связан с формированием данных по генерации пассажиропотоков и инициализацией необходимых статистических данных для выполнения моделирования процессов пассажиропотоков. Актуальность в свою очередь исходных данных гарантирует адекватный уровень абстракции модели цифрового двойника, а также реальность полученных результатов в процессе моделирования.

Этап 5. На данном этапе происходит оценка начальных и целевых показателей перемещения пассажиропотока. Такими, к примеру, могут являться: места генерации пассажиров, оценка траектории движения пассажиров, определение целевого параметра движения и т.д. Также на данном этапе реализуется механизм организации перемещения пассажиров в системе.

Этап 6. На данном этапе происходит оценка выполнения дискретно-событийной функции v , согласно представленной объектно-структурной модели ранее. В случае невыполнения происходит откат на этап 5, а в случае успеха происходит формирование выходного потока данных по пассажиропотоку.

Этап 7. Данный этап связан с анализом поступления пассажиров по внутреннему потоку или с внешней инфраструктуры города. В случае поступления пассажира в подсистему ВВТ из внешней инфраструктуры происходит формирование статистических данных о данном потоке в системе. В случае же поступления по внутреннему потоку пассажиров (из подсистемы ГНПТ) происходит переоценка загрузки подсистемы ГНПТ с учетом влияния подсистемы внутренних водных путей.

На этапе 8 формируется полная сборка статистических данных по оценке загрузки подсистем в модели цифрового двойника.

Полученные выходные статистические данные позволяют не только оценить текущее состояние работы подсистем, а также оценить взаимное влияние друг на друга с учетом взаимодействия с внешней инфраструктурой города.

Для построения моделей цифровых двойников [3] на сегодняшний день существует большое количество программного обеспечения с различными множествами функциональных возможностей. Для построения модели цифрового двойника за основу было выбрано программное обеспечение компании Anylogic, ввиду открытости исходного кода и наличия возможности реализации как собственных нестандартных блоков, так и реализации целых программных классов объектов для определения необходимой логики работы элемента подсистемы. Ввиду того, что ГНПТ и ВВТ являются системами массового обслуживания, а программное обеспечение имеет в своем составе три подхода построения модели, то данное программное обеспечение является оптимальным средством для достижения поставленной задачи в реализации модели цифрового двойника.

Рассматривая формирование в цифровом двойнике подсистемы ГНПТ важным моментом является реализация траекторий движения городского наземного транспорта, процесс декомпозиции пассажиропотока как по остановочным пунктам, так и по целям следования [4]. Для реализации нужной процессной логики использовался как дискретно-событийный метод построения (процессный), так и агентный. В данном случае под агентом в системе подразумеваются пассажиры, которые имеют, согласно представленной ранее объектно-структурной модели, ряд параметров, описывающих их индивидуальность, и которые учитываются в системе моделирования. Наземный пассажирский транспорт же в системе цифровой модели представляется в виде некоторого контейнера, задачей которого является в зависимости от определённых его характеристик – перемещение пассажиров нужную целевую точку.



Обеспечение реализации внутренних потоков между подсистемами ГНПТ и ВВТ достигается в модели за счет реализации собственного Java класса и создания объектов нестандартной логики работы как экземпляра данного класса [5].

На рисунке 4 представлен пример реализации подсистемы остановочных пунктов ГНПТ и процесса перемещения контейнера (транспортного средства) через опорные элементы подсистемы с присоединением агентов (пассажиров) или их извлечением при необходимости.

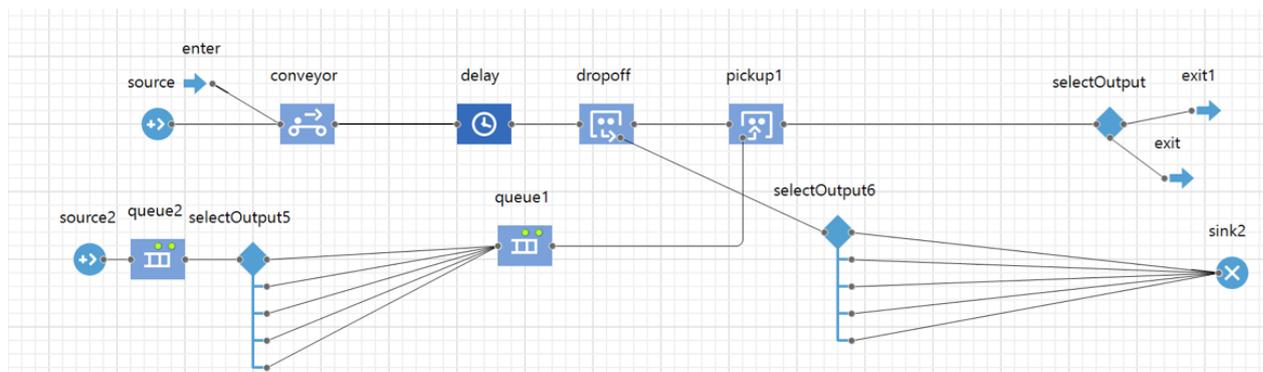


Рис. 4. Пример визуального представления структурных элементов цифрового двойника по реализации остановочных пунктов на одном транспортном маршруте ГНПТ

Процессное представление выхода пассажиров на опорных пунктах для пересадки на ВВТ с помощью структурных блоков имитационной модели представлено на рисунке 5.

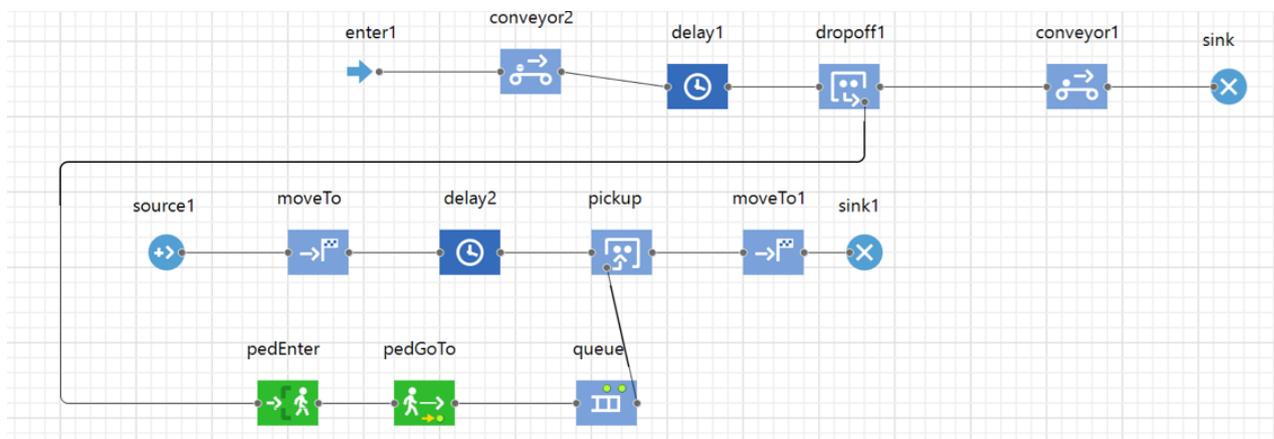


Рис. 5. Процессное представление выхода пассажиров на опорном пункте для пересадки на ВВТ с помощью блоков нестандартной логики

При этом общий 2D и 3D виды работы имитационной модели представлены на рисунке 6, рисунке 7 и рисунке 8 соответственно.



Рис. 6. 2D представление работы цифрового двойника на участке внутреннего потока подсистем ГНПТ и ВВТ



Рис. 7. 3D представление работы цифрового двойника на участке внутреннего потока подсистем ГНПТ и ВВТ камера 1

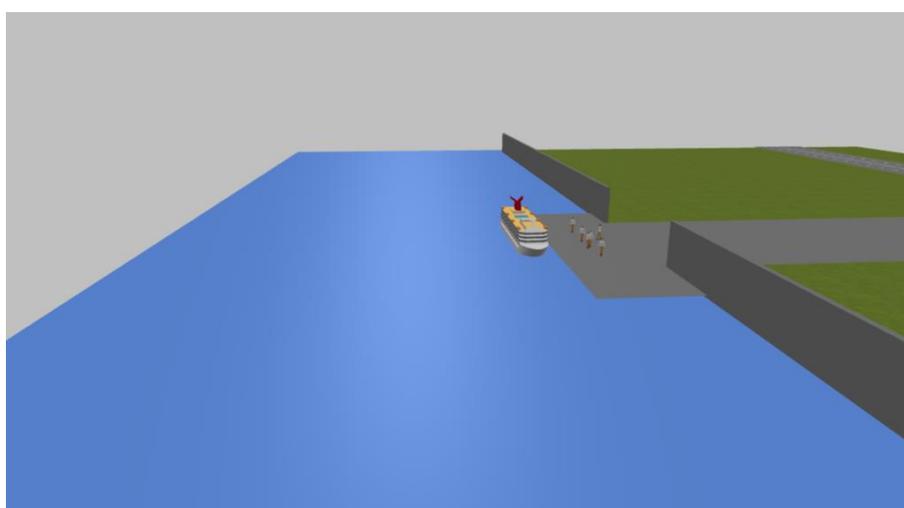


Рис. 8. 3D представление работы цифрового двойника на участке внутреннего потока подсистем ГНПТ и ВВТ камера 2



Пример формирования статистических данных об ожидании обслуживания на остановочных пунктах приведен на рисунке 9.

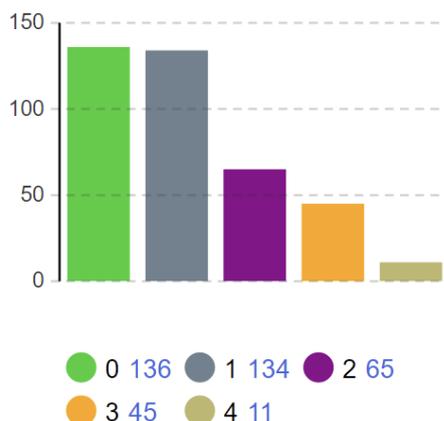


Рис. 9. Формирование статистических данных об ожидании обслуживания на примере 4 остановочных пунктов

Общая же средняя загруженность маршрута в подсистеме ГНПТ без использования подсистемы ВВТ для перераспределения нагрузки составила порядка 82% (рисунок 10). При этом стоит отметить, что на ряде узловых элементов S_n наблюдается максимальная загруженность, что говорит о перегрузке подсистемы ГНПТ.

Рис. 10. Загруженность подсистемы ГНПТ без внедрения ВВТ

При интеграции подсистемы ВВТ общая загруженность подсистемы ГНПТ составила порядка 54% (Рисунок 11).

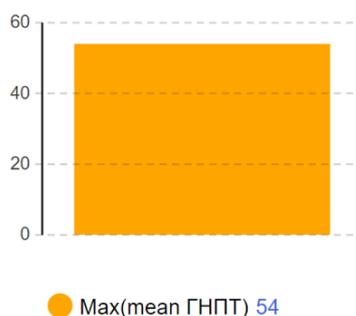


Рис. 11. Загруженность подсистемы ГНПТ с интеграцией ВВТ

Загрузка подсистемы ВВТ в данном случае составила в среднем порядком 45,76 (Рисунок 12).

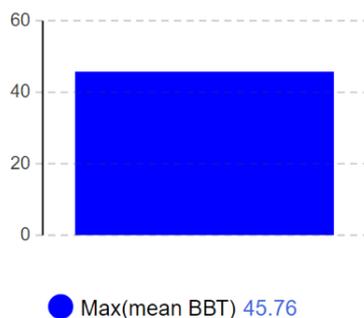


Рис. 12. Загруженность подсистемы ВВТ при выполнении задачи перераспределения нагрузки

Заключение

Таким образом, общая нагрузка на подсистему ГНПТ за счет интеграции ВВТ составила 28%. В связи с полученными результатами можно сделать вывод о том, что интеграция подсистемы ВВТ для решения задачи перераспределения нагрузки в системе является многообещающим подходом, который в достаточной степени позволяет решить обозначенную задачу. Результаты работы модели цифрового двойника позволяют однозначно определить высокую эффективность разработанной объектно-структурной модели, а также алгоритмической модели для решения задачи интеграции и перераспределения нагрузки в сложной технической системе [6] на примере транспортной системы мегаполиса. Модель цифрового двойника, разработанная на основе алгоритмического обеспечения по интеграции и оценке взаимодействия внутренних элементов транспортной системы, позволяет выполнить интеграцию внутренних водных путей с основной транспортной системой мегаполиса, а также оценить эффективность работы подсистем с целью выработки оптимальных методов управления.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Таратун В. Е. Имитационное моделирование как подход в решении задач систем массового обслуживания / В. Е. Таратун, В. С. Шаперова // Системный анализ и логистика. – 2020. – № 04(26). – С. 35-44.
 2. Комитет по развитию транспортной инфраструктуры Санкт-Петербурга: сайт [Электронный ресурс]. – URL: <https://krti.gov.spb.ru/> (дата обращения: 11.09.2023).
 3. Таратун В. Е. Роль цифровых двойников для развития интеллектуальных транспортных систем / Таратун В. Е., Таратун Е. А. // Сборник: Волновая электроника и инфокоммуникационные системы. Материалы XXIV Международной научной конференции. В 3-х частях. Санкт-Петербург. – 2021. – С. 294-299.
 4. Фетисов В. А. Моделирование транспортных систем / В. А. Фетисов, Н. Н. Майоров // СПб.: ГУАП. – 2011. – 165 с.
 5. Фетисов В. А. Моделирование транспортных процессов / В. А. Фетисов, Н. Н. Майоров, В. Е. Таратун // СПб.: ГУАП. – 2013. – 31 с.
- Таратун В. Е. Имитационное моделирование как метод оптимизации сложной технической системы / В. А. Фетисов, Н. Н. Майоров, В. Е. Таратун // Системный анализ и логистика. – 2013. – № 10. – С. 63-69.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Таратун Виталий Евгеньевич –

кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры системного анализа и логистики Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения 190000, Санкт-Петербург, ул. Большая Морская, д. 67, лит. А
E-mail: taratun.vitaliy@gmail.com



Таратун Екатерина Александровна –

ассистент кафедры системного анализа и логистики

Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения

190000, Санкт-Петербург, ул. Большая Морская, д. 67, лит. А

E-mail: losekaterina@yandex.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Taratun Vitaliy Evgenievich –

Candidate of Technical Sciences, senior lecturer of the Department of Systems Analysis and Logistics

Saint-Petersburg State University of Aerospace Instrumentation

67, Bolshaya Morskaya str., Saint-Petersburg, 190000, Russia

E-mail: taratun.vitaliy@gmail.com

Taratun Ekaterina Aleksandrovna –

assistant of the Department of Systems Analysis and Logistics

Saint-Petersburg State University of Aerospace Instrumentation

67, Bolshaya Morskaya str., Saint-Petersburg, 190000, Russia

E-mail: losekaterina@yandex.ru