

УДК 681.5, 519.2, 658.5, 656.072, 65.012.1 DOI: 10.31799/978-5-8088-2132-3-2026-7-2-103-112

Н. Н. Майоров*

доктор технических наук, профессор

М. Р. Язвенко*

аспирант, ассистент

*Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения

ИССЛЕДОВАНИЕ РАЗВИТИЯ МАРШРУТНОЙ СЕТИ ПАРОМНЫХ ЛИНИЙ В РЕГИОНЕ БАЛТИЙСКОГО МОРЯ НА ОСНОВЕ ЦИФРОВОЙ ТРАНСПОРТНОЙ МОДЕЛИ

Анализ развития и прогнозирование маршрутной сети паромных линий сегодня актуальны и востребованы. Растущий с каждым годом поток пассажиров как паромных, так и круизных линий увеличивает нагрузку на морские сети, что свою очередь может вызывать перегрузки портов. Оценить устойчивость портов и сети к увеличению пассажиропотока можно с помощью моделирования. В работе приведен программный модуль, моделирующий маршрутную сеть паромных линий Балтийского моря. Программный модуль разработан с применением комбинации дискретно-событийного моделирования, теории массового обслуживания и теории графов. Предлагаемая модель рассматривает паромы, пассажиров и порты как отдельные самостоятельные элементы с собственными характеристиками и поведением, которые задаются посредством баз данных. Моделирование произведено в имитационной среде AnyLogic. На основе разработанной модели возможны более углубленные и реалистичные симуляции паромных линий Балтийского моря при введении большего количества реальных данных, чем представлено в исследовании. Также структура модели может быть использована для моделирования паромных линий любого другого региона и любого масштаба при внесении необходимых изменений в карту модели.

Ключевые слова: паромные линии, Балтийское море, морские пассажирские перевозки, система массового обслуживания, Anylogic, граф сети.

N. N. Maiorov*

Dr. Sc., Tech., Professor

M. R. Yazvenko*

PhD Student, Assistant

*St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation

RESEARCH OF THE DEVELOPMENT OF A FERRY ROUTE NETWORK IN THE BALTIC SEA REGION BASED ON A DIGITAL TRANSPORT MODEL

Analysis of ferry route network development and forecasting are currently relevant and in demand. The increasing passenger flow of both ferry and cruise lines is placing increasing strain on maritime networks, which in turn can lead to port congestion. Modeling can be used to assess the resilience of ports and networks to increasing passenger traffic. This paper presents a software module for modeling the Baltic Sea ferry route network. The module was developed using a combination of discrete event modeling, queuing theory, and graph theory. The proposed model considers ferries, passengers, and ports as separate, independent elements with their own characteristics and behavior, which are defined through databases. The modeling was performed in the AnyLogic simulation environment. The developed model enables more in-depth and realistic simulations of Baltic Sea ferry lines by introducing a larger amount of real data than presented in the study. Furthermore, the model structure can be used to model ferry lines in any other region and at any scale, with the necessary modifications to the model map.

Keywords: ferry lines, Baltic Sea, sea passenger transportation, queueing system, Anylogic, network graph.

Введение

Сегодня морские пассажирские порты и терминалы являются новыми точками роста развития городов, регионов, центрами внедрения новых технологических решений для ускорения обработки пассажиропотока круизных и паромных судов. На основе развития морских

портов и терминалов в различных регионах морей можно сказать, что значительно возросла роль морских пассажирских портов в глобальных транспортно-экономических системах. Современные кризисные явления и имеющее место обострение конкуренции между морскими портами во всех вертикальных звеньях и горизонтальных эшелонах транспортных и логи-

стических сетей создают растущее экономическое давление на операционную деятельность каждого из портов, что требует разработки новых моделей и методов для решения задачи прогнозирования развития на качественно новом уровне.

Морские паромные перевозки глубоко интегрированы в наземные транспортные сети и в ряде случаев использование паромных перевозок обеспечивает наибольшую эффективность процесса перевозки.

Внешняя среда диктует новые условия, к которым инфраструктура морских пассажирских портов и терминалов должна быть готова. К примеру, несмотря на известный график судо-заходов в пассажирский порт, может возникнуть ситуация, когда возникнет влияние стохастических факторов на работу порта, вероятностные процессы в расписании судо-заходов. Рассматриваемые вопросы крайне актуальны, так как их рассмотрение и решение позволят сформировать новую модель системы принятия решения с учетом влияния внешней среды и ответить на вопросы модернизации инфраструктуры и прогнозирования развития.

Решение может быть найдено на основе разработки цифровой модели для интеграции данных различных сценариев моделирования цифровых транспортных моделей портов и терми-

налов. Данные позволяют повысить точность принятия решений при неопределенности, но последующей модернизации на основе больших данных от моделирования.

В данной работе описаны результаты разработки программного модуля для проведения моделирования паромных линий Балтийского моря с использованием дискретно-событийного моделирования и теории графов.

Моделирование паромных линий на основе теории графов

Паромные линии – это транспортные сообщения по фиксированным маршрутам через водные преграды (пролив, залив, между портами одного моря) на специальных судах-паромах. Паромы перевозят грузы, пассажиров и подвижной состав, связывают обычно порты на противоположных берегах пролива, залива или внутреннего моря по кратчайшему пути.

Паромные линии связывают, как минимум, два порта. Маршрутная сеть таких линий и связанных с ними портов в пределах одного региона можно исследовать с помощью теории графов [1, 2]. Паромные линии постоянные с фиксированным расписанием. Есть определенные маршруты, на которых осуществляется паромное движение с определенной частотой. По-

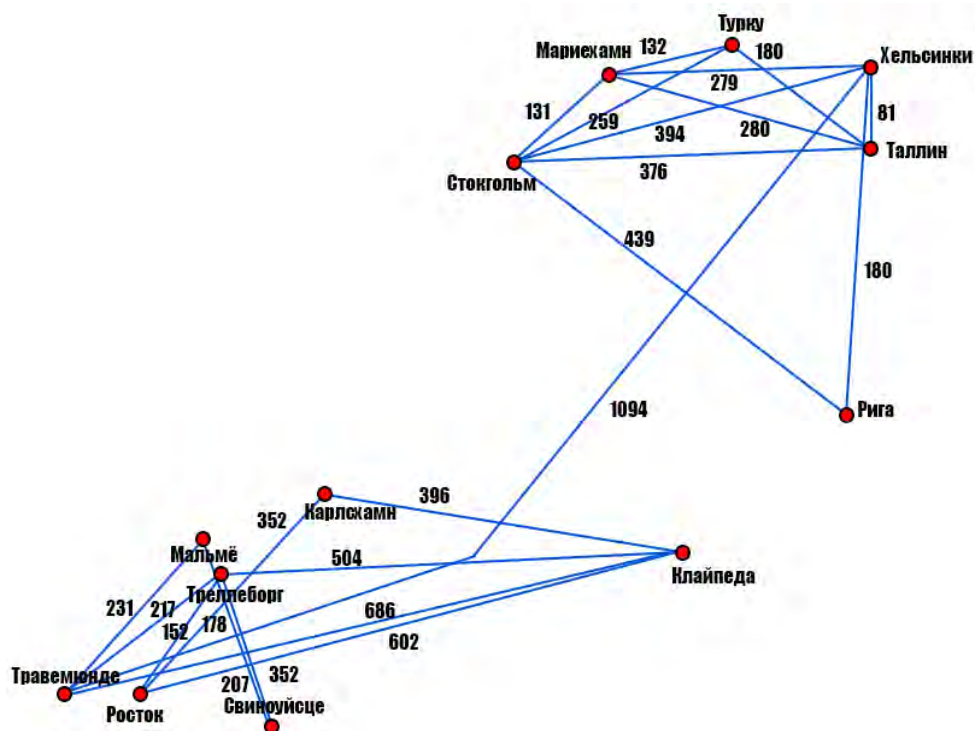


Рис. 1. Граф паромных линий Балтийского моря

сколько линии постоянные – они известны и отображаются множеством онлайн-сервисов, а также нанесены на популярные онлайн-карты. Одним из сервисов, предоставляющим доступ ко всем существующим паромным линиям в мире, является сервис FerryRoutes [3]. Данный сервис имеет различные инструменты для просмотра всех существующих и отмененных паромных линий в мире.

С помощью инструментов сервиса можно создать сеть паромных маршрутов между крупными портами Балтийского моря. Порты соединяются между собой паромными линиями, соответственно такая сеть полностью обладает необходимыми свойствами для представления ее в виде графа. Паромные линии действуют в обе стороны, поэтому граф получается неориентированным.

В Балтийском регионе сформирована выборка из 13 крупных портов, входящих в паромные линии: Хельсинки, Таллин, Турку, Мариехамн, Стокгольм, Рига, Клайпеда, Карлсхамн, Травемюнде, Росток, Треллеборг, Мальмё, Свиноуйсьце. При помощи сервиса на основе отмеченных портов был построен граф сети паромных линий Балтийского моря с указанием расстояний между портами (рис. 1).

С помощью данного графа можно решать различные задачи маршрутизации, как например, задача поиска кратчайшего пути между двумя портами, не имеющими прямого сообщения. В данном исследовании граф был использован для формирования фундамента для имитационного моделирования работы паромных линий.

Успешное моделирование графов с помощью ЭВМ выполняется с помощью матриц смежно-

сти и инцидентности, характеризующих графы. Поскольку граф морских паромных линий неориентированный и не имеет петель, то для его полного описания достаточно матрицы смежности.

На основе сформированной матрицы (табл. 1) можно представить модель морских паромных линий в регионе Балтийского моря с учетом определения взаимного влияния между портами, определения вклада каждого порта в общий объем морских паромных (круизных перевозок) в регионе выбранного моря. Матричная форма является основой для формирования преобразований матричной формы в форму круговых диаграмм интенсивностей Circos (Circos Table). Circos диаграмма – это информационный инструмент для визуализации данных и информации по взаимосвязи между элементами. Circos диаграммы визуализируют данные в виде окружности – это делает данные диаграммы некоторым универсальным решением для изучения взаимосвязей между объектами или позициями элементов, оценки вклада и взаимного влияния элементов в выбранной системе между собой. При использовании данной модели открывается возможность системно представить регион Балтийского моря и вклад каждого морского пассажирского порта в сегмент морских паромных перевозок. Математическая модель выполнения преобразований для формирования матричных данных в Circos диаграмму интенсивностей представлена детально в работах [4, 5]. В статье [6] приведены итоговые круговые диаграммы интенсивностей за 2018–2019 гг. с учетом деления региона Балтийско-

Таблица 1

Паромные сети между морским пассажирскими портами в Балтийском море (2025 г.)

	Hels	Karl	Klaip	Malmo	Marie	Riga	Rostock	Stock	Swin	Tallin	Traw	Trel	Turku
Helsinki	0	0	0	0	1	1	0	1	0	1	1	0	0
Karlshamn	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0
Klaipeda	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0
Malmo	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0
Mariehamn	1	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	1
Riga	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
Rostock	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0
Stockholm	1	0	0	0	1	1	0	0	0	1	0	0	1
Swinouzche	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0
Tallin	1	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	1
Trawemunde	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0
Trelleborg	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	1	0	0
Turku	0	0	0	0	1	0	0	1	0	1	0	0	0

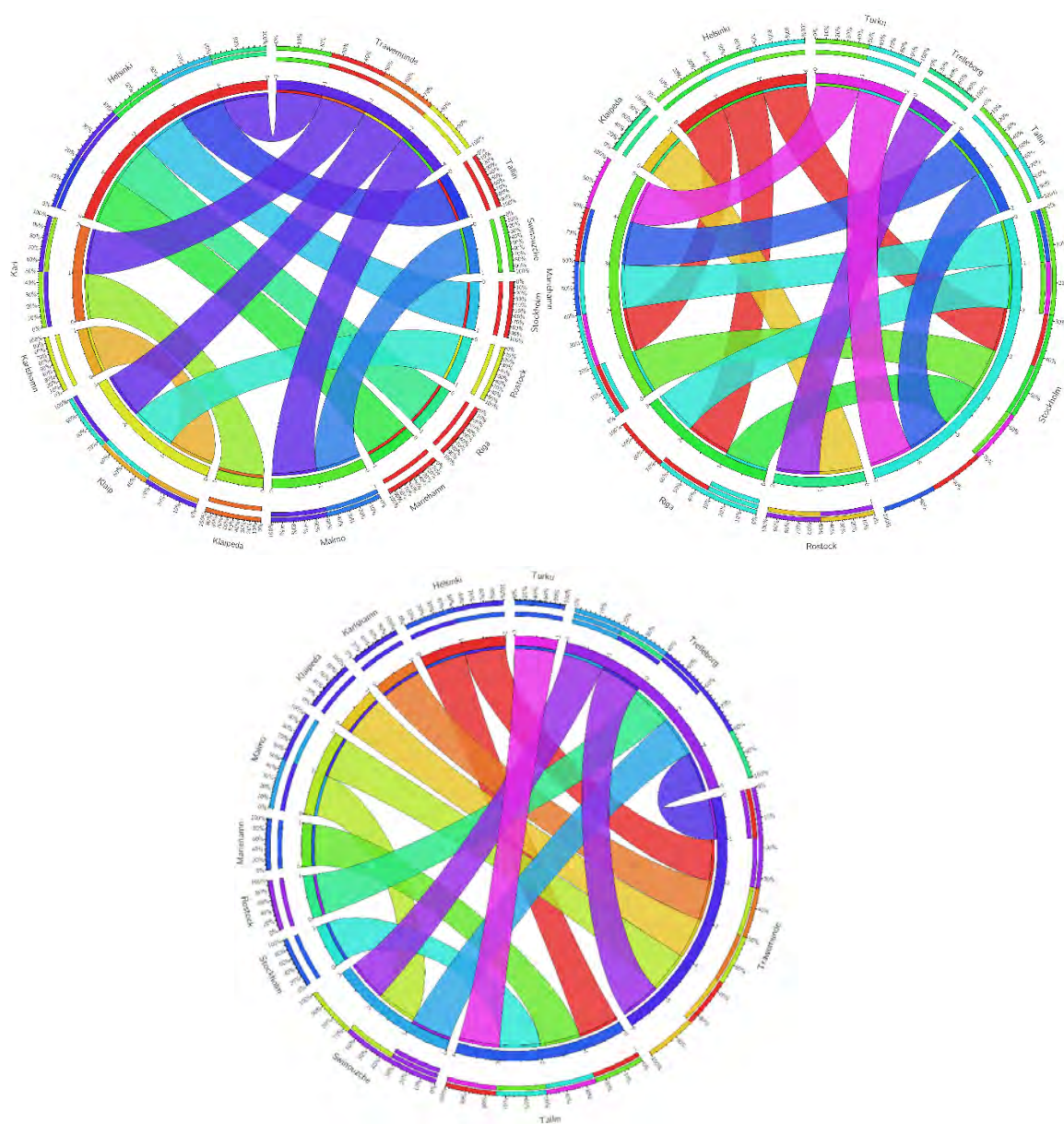


Рис. 2. Круговые диаграммы интенсивностей Circos для Балтийского моря на 2025 г.

го моря на четыре сегмента. На основе данных навигации за 2025 г. [3] были получены новые диаграммы Circos, представленные на рис. 2. Для улучшения представления данных исходная матрица была разделена на отдельные три участка с учетом выборки четырех морских пассажирских портов.

Имитационное моделирование паромных линий

Паромные линии региона описываются с помощью дискретно-событийного (процессного)

имитационного моделирования (ИМ). Основа применения процессного моделирования описана в работах [2, 7, 8]. Все происходящие процессы можно разделить на две группы: процессы, происходящие на линии в море; и процессы, происходящие в порту.

На линии, паромы курсируют между портами и заходят в них для обслуживания, посадки-высадки пассажиров и разгрузки-погрузки автомобилей. Соответственно, данные события выстраиваются в последовательность для моделирования:

- 1) выход судна на линию;

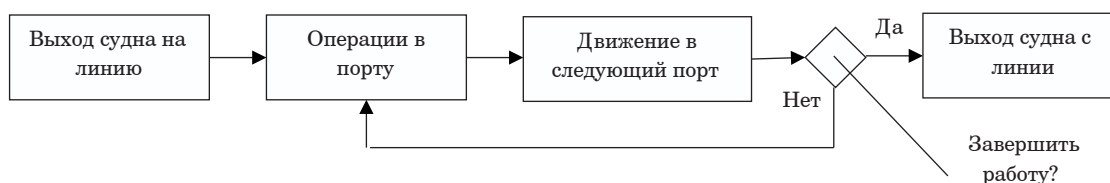


Рис. 3. Схема модели движения судна на паромной линии в дискретно-событийном моделировании

2) погрузка и разгрузка пассажиров и автомобилей в порту;

3) движение к следующему порту;

4) выход судна с линии.

При этом, события 2 и 3 повторяются, пока не поступит команда к выполнению события 4. При каждом успешном выполнении событий 2 и 3 порт назначения будет меняться. В случае челночного движения паромов на линии порт отправления и порт назначения будут меняться друг с другом местами. Таким образом, схема модели движения судна на паромной линии принимает следующий вид (рис. 3).

В порту образуется поток пассажиров, которые собираются отправиться на пароме в нужную им точку, а также принимается поток прибывающих на паромов пассажиров. Заходящие паромы также требуют обслуживания ресурсами порта (причалами) с помощью теории массового обслуживания, что описывается в работах [8, 9].

Соответственно, происходящие события в порту моделируются следующей последовательностью:

– параллельные события:

1.1) заход судна в порт;

1.2) появление пассажиров на посадку;

– параллельные события:

2.1) ожидание судном причала при его занятости;

2.2) ожидание посадки на судно пассажирами;

3) разгрузка пассажиров и автомобилей в порту;

4) проход и обслуживание пассажиров на выбранный паром;

5) выход судна из морского пассажирского порта.

При этом для потока пассажиров за событием 2.2 идет событие 4, после которого пассажиры объединяются с судном и проходят через диаграммы процессов судна, пока не достигнут события 3 из этой же диаграммы, но другого порта. Таким образом, схема модели процессов в порту принимает следующий вид (рис. 4)

Для имитационного моделирования была выбрана среда AnyLogic [10], обоснованность применения которой была представлена в работах [2, 8, 9].

Моделирование работы паромных линий будет строиться блоками библиотеки моделирования процессов AnyLogic, внешний вид которых и их действие описаны в табл. 2.

Паромы и порты представляются как агенты модели. Агент в AnyLogic – это объект языка Java. Соответственно, они обладают собственными характеристиками, хранят переменные и собственные исполняемые функции и процессы. Для каждого конкретного агента значения характеристик и его состояние может быть индивидуальным и различным.

Таким образом, каждый паром хранит данные о его вместимости, скорости движения, пассажирах на борту и точках движения (рис. 5). Данные точки (узлы) используются в блоке MoveTo как пункт назначения (переменная имеет тип *Node*). Узлы (тип *Node*) – инструмент

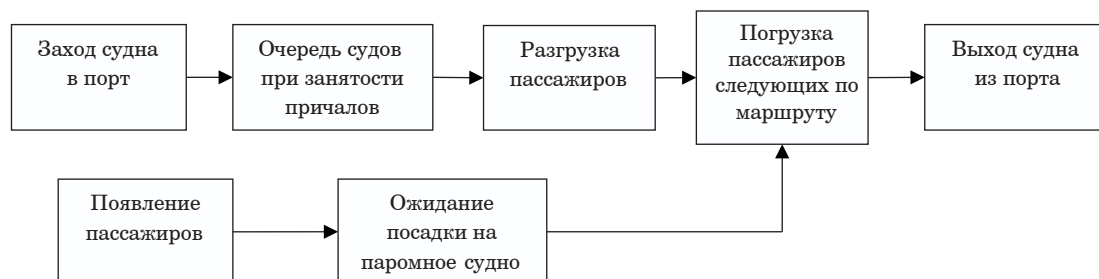
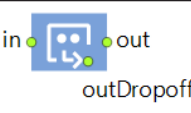


Рис. 4. Схема модели процессов в порту в процессном моделировании

Таблица 2

Основные блоки при моделировании морских паромных линий

Название	Действие	Внешний вид
Source	Создание агентов в системе	
Queue	Моделирование очереди	
MoveTo	Моделирование движения агента от точки А в точку Б	
Delay	Задерживает агента	
Pickup	Агент-контейнер подбирает агентов, которые продолжают движение вместе с ним	
Dropoff	Агент-контейнер высаживает, прикрепленных к нему, агентов	
Exit	Агент направляется в другую часть диаграммы процесса (логики) через соответствующий блок Enter	
Enter	Появление агента, направленного блоком Exit	
Sink	Удаление агента из системы	

AnyLogic для разметки пространства, моделирующий какой-либо пункт интереса, пересечение двух путей или же просто узел сети. У паромы хранятся 3 переменные: переменная для пункта отправления, переменная для порта назначения, и переменная для следующего порта. Подобная схема позволяет моделировать паромную линию с несколькими пунктами движения с памятью о совершенной части маршрута, для защиты от ошибок и возможной потери судна в пространстве. При моделировании челночного движения схема крайне удобная, поскольку позволяет поменять местами порты назначения через третью переменную.

С помощью инструментов разметки пространства (узлы и пути) воссоздается схема паромных линий. Точечными узлами красного цвета изображены указанные ранее порты. Пунктирные линии – это паромные линии в виде траектории движения судов на ней. Различные цвета линий не имеют физического

смысла и введены только для повышения визуальной читаемости карты.

С использованием блоков программной библиотеки, модель движения судов на паромной линии можно моделируется следующим образом. Блоки enter служат для направления судна в диаграмму процесса в порту (рис. 6).

Портовые операции происходят в каждом порту отдельно. Диаграмма процессов из рисунка ниже располагается в типе агента Порт. Соответственно, парные блоки exit_port и enterShip заберут судно из части модели моря и направят в диаграмму процесса конкретного порта. После всех портовых процессов, судно вернется в морскую часть модели через парные блоки exit и enter (рис. 7).

Маршруты на линиях создаются с помощью составленной матрицы смежности графа региона. Созданная матрица смежности может быть прямо использована для создания маршрутов с использованием сложных SQL-запросов

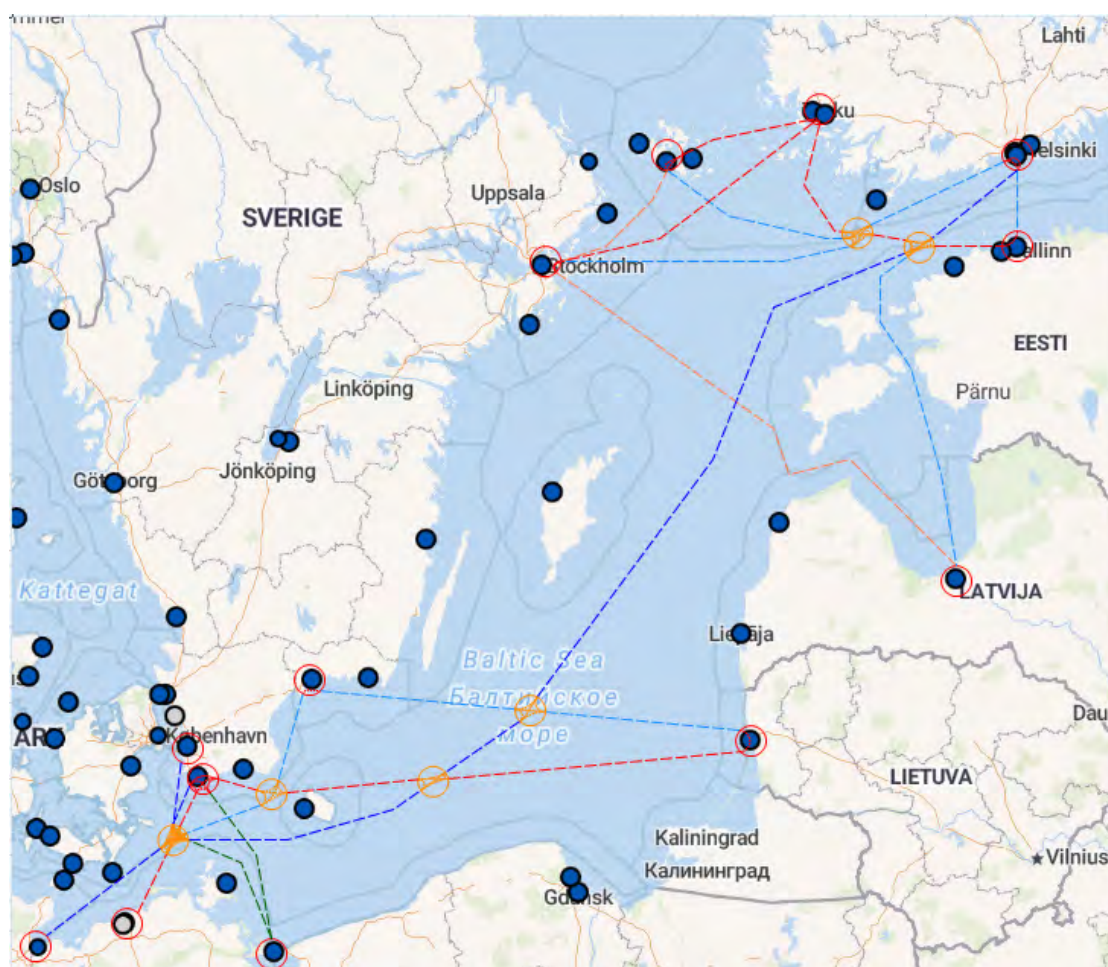


Рис. 5. Карта паромных линий Балтийского моря в среде имитационного моделирования

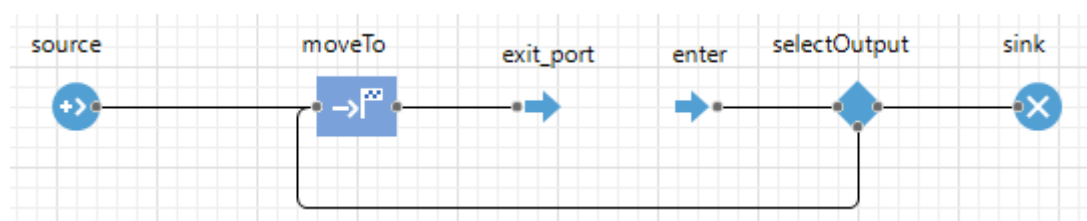


Рис. 6. Схема логики движения судна в среде имитационного моделирования

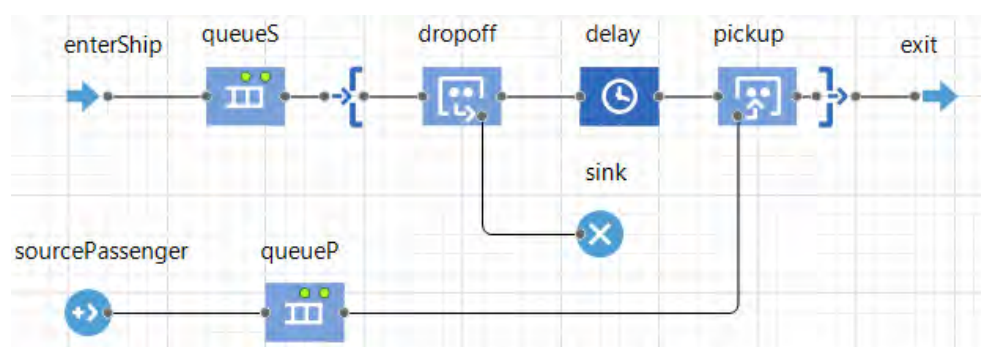


Рис. 7. Схема логики портовых операций в среде ИМ

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O
1			Hels	Karl	Klaip	Malmo	Marie	Riga	Rostock	Stock	Swin	Tallin	Traw	Trel	Turku
2			0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
3	Helsinki	0	0	0	0	0	1	1	0	1	0	1	1	0	0
4	Karlshamn	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0
5	Klaipeda	2	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0
6	Malmo	3	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0
7	Mariehamn	4	1	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	1
8	Riga	5	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
9	Rostock	6	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0
10	Stockholm	7	1	0	0	0	1	1	0	0	0	1	0	0	1
11	Swinouzche	8	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0
12	Tallin	9	1	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	1
13	Trawemunde	10	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0
14	Trelleborg	11	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	1	0	0
15	Turku	12	0	0	0	0	1	0	0	1	0	1	0	0	0

Рис. 8. Матрица смежности в MS Excel

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O
1			Hels	Karl	Klaip	Malmo	Marie	Riga	Rostock	Stock	Swin	Tallin	Traw	Trel	Turku
2	Helsinki	0	0	0	0	0	2	0	0	2	0	5	3	0	0
3	Karlshamn	1		0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4	Klaipeda	2			0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0
5	Malmo	3				0	0	0	0	0	0	0	3	0	0
6	Mariehamn	4					0	0	0	5	0	1	0	0	1
7	Riga	5						0	0	0	0	0	0	0	0
8	Rostock	6							0	0	0	0	0	5	0
9	Stockholm	7								0	0	1	0	0	3
10	Swinouzche	8									0	0	0	2	0
11	Tallin	9										0	0	0	0
12	Trawemunde	10											0	3	0
13	Trelleborg	11												0	0
14	Turku	12													0

Рис. 9. Преобразование матрицы в MS Excel морских пассажирских портов

и Java-кода. Для моделирования матрица смежности была преобразована так, чтобы конечным результатом являлся список линий с начальной и конечной точкой, а также количеством паромов. В матрице смежности все порты сортируются по алфавиту (рис. 8).

Граф региона неориентированный, поэтому матрица смежности будет симметрична относительно главной диагонали. Все значения ниже диагонали отбрасываются, чтобы избежать дублирования. Второе преобразование – запись количества обслуживающих линию паромов. Данная информация находится в открытых источниках. С точки зрения теории графов, каждый отдельный паром будет образовывать собственную пару значений порт-порт, и когда эти пары совпадают, возникает параллельность ребер. Рассмотрение маршрута каждого парома как отдельного ребра позволяет использовать количество паромов на одной паромной линии в матрице смежности, поскольку порты будут смежны такое количество раз, сколько паромов его обеспечивает. Преобразованная

матрица смежности с актуальностью на период с 24.11.2025 по 30.11.2025 (рис. 9).

Готовая таблица импортируется в модель AnyLogic как база данных с помощью соответствующего мастера. Блок Source самостоятельно создает необходимое количество паромов и задал им их маршрут по данной базе.

Оконная форма с движущимися по линиям паромами представлена на рис. 10.

Результаты моделирования морских паромных линий

Данная статья фокусируется на создании технической основы модели для исследования паромных линий Балтийского моря и использует лишь некоторые реальные данные, а именно – количество активных паромов на линии. Другие данные, такие как скорость движения, время стоянки, вместимость паромов, интенсивность прибытия пассажиров и количество причалов в портах, выбираются усредненно для демонстрации работоспособности модели. С подобными упрощениями можно получить важ-

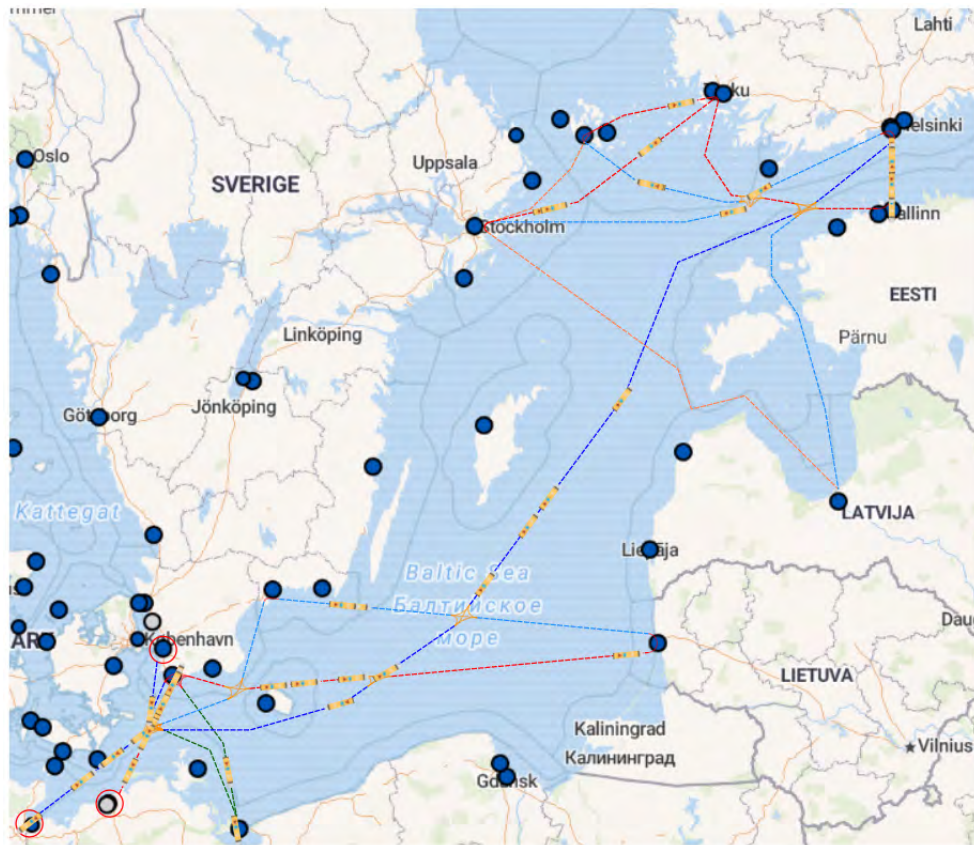


Рис. 10. Оконная форма с движением судов в имитационной модели

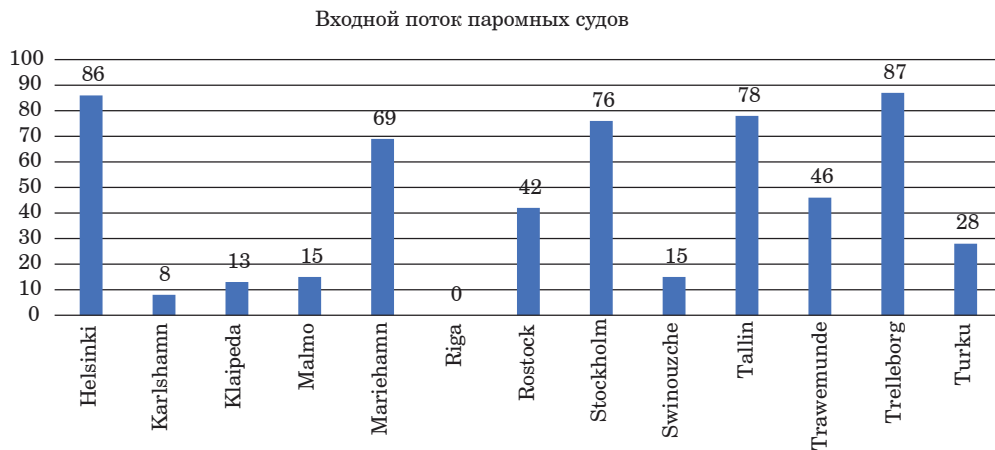


Рис. 11. Гистограмма судозаходов в порты за неделю имитационного моделирования

ные прогнозные данные из модели, например, объемы движения паромов через выбранные порты по полученным ранее данным (рис. 11).

Из гистограммы (рис. 11) можно видеть, что наиболее частыми направлениями являются Хельсинки, Треллеборг, Таллин, Стокгольм и Мариехамн. В ходе моделирования одной неде-

ли работы линий, общее количество перевезенных пассажиров – 1440,5 тыс. человек. Полученные интенсивности соответствуют данным о пассажиропотоке Балтийского моря, представленные в исследовании в работах [11, 12]. За счет большего использования данных, а также моделирования в течение года, а не одной

недели ноября, данные выполненного моделирования работы морских паромных линий будут соответствовать реальным данным потока.

Выводы

В ходе представленного исследования были проанализированы морские паромные линии Балтийского моря и составлен их граф. С использованием графа была разработана имитационная модель паромных линий, моделирующая движение судов на линиях, пассажиропоток, а также портовые операции. С помощью данной модели было проведено моделирование одной недели работы линий по данным ноября 2025 г. и были получены интенсивности заходов паромов в порты. Данная модель может быть использована для более подробного анализа паромных линий Балтийского моря за счет введения большего количества реальных данных, как реальной интенсивности прибытия пассажиров, вместимостей и скоростей паромов. Представленные имитационные модели и круговые диаграммы интенсивностей *Circos* могут быть применены для других регионов морей, для решения задачи прогнозирования развития морских паромных линий и определения текущего положения порта в сфере морских паромных перевозок в регионе моря.

Библиографический список

1. Прокушев, Л. А. Дискретная математика: Основы теории графов и алгоритмизации задач: учеб. пособие / Л. А. Прокушев. – СПб.: ГУАП, 2000. – 81 с.
2. Майоров, Н. Н. Моделирование транспортных процессов / Н. Н. Майоров, В. А. Фетисов. – СПб.: ГУАП, 2011.
3. Global Ferry Routes Map – All Ferry Connections Worldwide. – URL: <https://ferryroutes.com> (дата обращения: 01.10.2025).
4. Krile, S. Work analysis of maritime passenger terminals for particular region based on *circos* plot / S. Krile, N. N. Maiorov // *Nase More*. – 2019. – Vol. 66, no. 2. – P. 57–61. – Doi: 10.17818/NM/2019/2.2.
5. Maiorov, N. N. Research of the transport terminal position based on the analysis of the digital *circos* model / N. N. Maiorov // 2021 Wave Electronics and its Application in Information and Telecommunication Systems, WECONF 2021 – Conference Proceedings, St. Petersburg, 31.05–04.06.2021. Vol. 4. – St. Petersburg, 2021. – P. 9470582. – Doi: 10.1109/WECONF51603.2021.9470582
6. Майоров, Н. Н. Прогнозирование развития морских пассажирских терминалов и сети паромных линий в регионе Балтийского моря / Н. Н. Майоров // Вестник государственного университета морского и речного флота им. адмирала С. О. Макарова. – 2018. – Т. 10, № 6. – С. 1299–1311. – Doi: 10.21821/2309-5180-2018-10-6-1299-1311.
7. Майоров, Н. Н. Морские паромные и авиационные транспортные процессы и системы / Н. Н. Майоров. – СПб.: ГУАП, 2020. – 123 с.
8. Язвенко, М. Р. Моделирование морского грузового порта как системы массового обслуживания в среде AnyLogic / М. Р. Язвенко, А. Г. Морозков // Системный анализ и логистика. – 2020. – № 4 (26). – С. 59–66. – Doi: 10.31799/2007-5687-2020-4-59-66.
9. Язвенко, М. Р. Исследование загруженности причалов морского пассажирского порта на основе моделирования / М. Р. Язвенко // Системный анализ и логистика. – 2021. – № 2(28). – С. 104–113. – Doi: 10.31799/2077-5687-2021-2-104-113.
10. AnyLogic: имитационное моделирование для бизнеса. – URL: <https://www.anylogic.ru/> (дата обращения: 10.11.2025).
11. Майоров, Н. Н. Универсальная имитационная модель входного потока судов в Морской пассажирский порт / Н. Н. Майоров, М. Р. Язвенко // Волновая электроника и инфокоммуникационные системы: Сб. ст. XXVIII Междунар. науч. конф. В 3-х частях, Санкт-Петербург, 12–16 мая 2025 года. – СПб.: ГУАП, 2025. – С. 179–185.
12. Baran, K. A Comparative Analysis of Seaports in Terms of the Development of Maritime Tourism in the Area of the Baltic Sea. *Water* / K. Baran, T. Neumann. – 2023. – Vol. 15. – 3721. 10.3390/w15213721.