



Математическое моделирование управления перегрузочными процессами в морском порту



Александр ПРОХОРЕНКОВ
Alexander M. PROHORENKOV

Роман ИСТРАТОВ
Roman A. ISTRATOV



Прохоренков Александр Михайлович – кандидат технических наук, профессор кафедры автоматизации и вычислительной техники Мурманского государственного технического университета (МГТУ). Истратов Роман Александрович – аспирант МГТУ.

Для решения задач управления перегрузочными процессами разработана граф-модель и её аналог – матричная модель, которые позволяют с разных сторон взглянуть на проблемы оптимизации грузовой работы в морском транспортном узле. В статье представлены результаты моделирования, помогающие оценить затраты на производство, а также оптимизировать условия перегрузки грузов по экономическому критерию – суммарному комплексному расходу на перемещение грузопотока. Случайный характер процессов, протекающих в инфраструктурах транспортного узла, дает возможность интерпретировать строящиеся здесь управленческие модели как вероятностные и относить их к моделям массового обслуживания.

Ключевые слова: морской порт, модель транспортного узла, портовые услуги, перегрузочный процесс, информационные технологии, методы управления.

В системе перевозок именно транспортные узлы являются центральным звеном. В них начинается и заканчивается доставка грузов, происходят процессы их перевалки с одного вида транспорта на другой. Несмотря на ввод в эксплуатацию новых портовых перегрузочных комплексов, потребность России в них удовлетворяется не полностью, а по переработке внешнеторговых грузов – менее семидесяти процентов. В этой связи реальным направлением повышения эффективности транспортных узлов остается оптимизация управления перегрузочными процессами порта, его инфраструктурой на основе применения современных информационных и компьютерных технологий. А стремление к оптимизации вызывает, в свою очередь, необходимость максимальной формализации способов принятия решений как по оперативному диспетчерскому управлению перегрузочными процессами, так и при их модернизации и реорганизации.

Перегрузочные процессы в транспортном узле рассматриваются нами в качестве объектов моделирования, позволяющих решать самые разные задачи оптимального управления. Случайный харак-

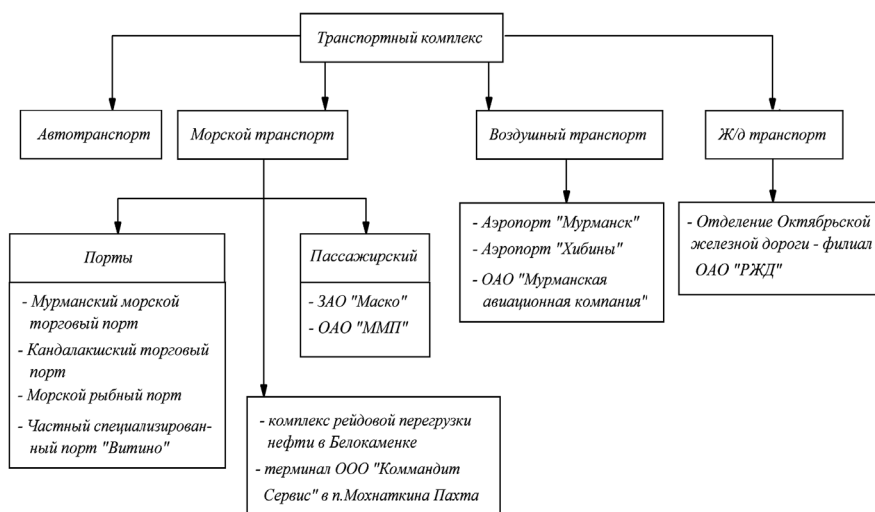


Рис. 1. Состав и структура Мурманского транспортного узла.

тер процессов, протекающих в инфраструктурах транспортного узла, дает возможность интерпретировать строящиеся здесь управленческие модели как вероятностные и относить их к моделям массового обслуживания [1, 3, 4].

РЕСУРСЫ РАЗВИТИЯ МУРМАНСКОГО УЗЛА

В транспортный комплекс Мурманской области входят предприятия и организации железнодорожного, морского, автомобильного и воздушного транспорта. Состав и структура Мурманского транспортного узла (МТУ) представлена на рис. 1.

Наряду с существующим комплексом предполагается и такое развитие МТУ, которое предусматривает строительство и наращивание транспортной инфраструктуры на восточном и западном берегах Кольского залива. Особое значение имеет строительство железнодорожной инфраструктуры. Перспективы развития МТУ иллюстрирует таблица 1.

Основа развития МТУ — уникальное географическое положение терминалов порта Мурманска, который расположен на берегу Кольского залива:

— порт имеет свободный выход в открытый океан с относительно низкой интенсивностью судоходства и располагается близко к международным морским трассам;

— порт является незамерзающим, глубоководным, защищенным от штормов, круглогодичным — в отличие от многих мировых портов, потенциальных конкурентов МТУ;

— порт экономически независим от других стран ввиду отсутствия необходимости прохождения через их территориальные воды;

— близость зоны к европейскому и американскому рынкам;

— возможность использования международных транспортных коридоров Севморпуть, Транссиб, Север — Юг;

— свободные, неосвоенные территории на западном берегу Кольского залива;

— освоение Штокмановского газоконденсатного месторождения в Баренцевом море, ожидаемая транспортировка газа в посёлок Териберка, где планируется возвести завод по производству сжиженного природного газа, а также строительство в местной бухте порта-хаба для работы с судами-газовозами;

— надежные транспортные связи порта Мурманск с промышленными регионами России.

Нарисованная картина — диспозиция ситуации, которая делает столь важной разработку концептуальной и теоретико-методологической базы для моделирования, а затем и оптимизации процессов в транспортном узле.



Перспективы развития МТУ

Западный берег	Восточный берег	Посёлок Териберка
<p>Строительство:</p> <ul style="list-style-type: none"> – железнодорожной ветки пос. Мурмаши – Лавна; – угольного терминала; – причала для контейнеров; – причала для генеральных грузов; – нефтеперегрузочного комплекса. 	<p>Строительство и модернизация перегрузочных комплексов:</p> <ul style="list-style-type: none"> – по перевалке генеральных грузов; – угля; – глинозема, – апатитового концентрата; – минеральных удобрений; – наливных грузов. 	<p>Строительство терминала по перевалке сжиженного газа.</p>

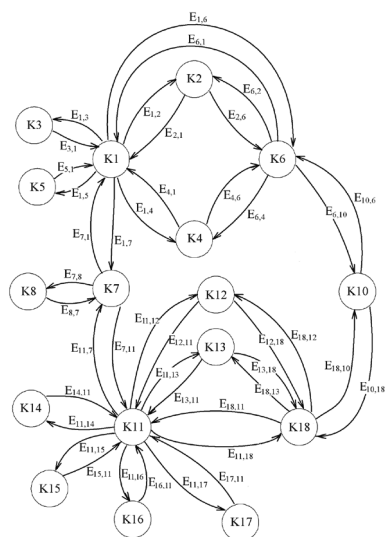


Рис. 2. Граф-модель перегрузочных процессов транспортного узла.

ГРАФ-МОДЕЛЬ ПЕРЕГРУЗОЧНЫХ ПРОЦЕССОВ

Основной проблемой организации эффективного взаимодействия всех пользователей, участвующих в процессе обработки грузов Мурманского транспортного узла, является отсутствие как регионального, так и портовых логистических центров. С учетом этого для реализации программы инновационного развития ОАО «Мурманский морской торговый порт» нами разработаны предложения по внедрению в состав комплексной информационной системы целевой подсистемы «Управление перегрузочными процессами». Такая подсистема призвана способствовать оперативной оценке затрат на перегрузочные процессы в транспортном узле с использованием различных транспортных средств по экономическому критерию – суммарному комплексному расходу на перемещение грузопотока.

Применительно к перегрузочным процессам в морском торговом порту, входящим в состав Мурманского транспортного узла, представление модели объекта исследования в виде графа и его аналога – матричной модели позволяет всесторонне взглянуть на задачу оптимизации различных по содержанию вариантов перегрузки грузов [2, 3, 5].

Составим граф-модель транспортного узла. В каждом подобном узле существуют такие подсистемы, как причалы, терминалы, грузовые фронты железной дороги и автотранспортной дороги. Для получения граф-модели представим эти подсистемы пунктами погрузки-разгрузки с вершинами графа: $K = \{K1, K2, \dots, KN\}$ ($N = 1 \dots 17$) и множество дуг $E = \{E12, E21, \dots, E17, E71\}$ – направления перевозки грузов. Граф-модель $V(K, E)$ перегрузочных процессов МТУ изображена на рис. 2, где приняты следующие обозначения:

- K1, K7, K10 – пункты железной дороги;
- K2-K5 – терминалы Западного берега;
- K8 – терминал в Териберке;
- K11-K16, K18 – терминалы Восточного берега;
- K6, K17 – площадки для автотранспорта;
- K9 – аэропорт.

Граф V является ориентированным, поскольку все дуги имеют направленность. По теории графов его можно представить аналогично в виде матрицы перемещения $M = \|m_{ij}\|$, где i – строки, представляющие вершины графа, а j – столбцы (по одному на каждую дугу). Элементы матрицы m_{ij} определяются следующим образом:

$$m_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{если дуга выходит из } i\text{-й вершины в } j\text{-ю,} \\ -1, & \text{если дуга входит из } j\text{-й вершины,} \\ 0, & \text{если дуга не входит и не выходит из вершины.} \end{cases}$$

Матрица M приведена в таблицах 2 и 3. Строки ее обозначают направления пере-

Таблица 2

Матрица перемещения грузов в терминалах Западного берега транспортного узла

	E_{12}	E_{21}	E_{13}	E_{31}	E_{14}	E_{41}	E_{15}	E_{51}	E_{16}	E_{61}	E_{17}	E_{71}	E_{26}	E_{62}	E_{16}	E_{64}	E_{69}	E_{66}	E_{18}	E_{67}	$E_{7,10}$	
K_1													0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
K_2			0	0	0	0	0	0	0	0	0	0			0	0	0	0	0	0	0	0
K_3	0	0			0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
K_4	0	0	0	0			0	0	0	0	0	0	0	0			0	0	0	0	0	0
K_5	0	0	0	0	0	0			0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
K_6	0	0	0	0	0	0	0	0			0	0								0	0	0
K_7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0			0	0	0	0	0	0	0			
K_8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
K_9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0			0	0	0	0
K_{10}	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	

Таблица 3

Матрица перемещения грузов в терминалах Восточного берега транспортного узла

	$E_{10,7}$	$E_{9,17}$	$E_{17,9}$	$E_{10,11}$	$E_{11,10}$	$E_{10,12}$	$E_{12,10}$	$E_{10,13}$	$E_{13,10}$	$E_{10,14}$	$E_{14,10}$	$E_{10,15}$	$E_{15,10}$	$E_{10,16}$	$E_{16,10}$	$E_{10,17}$	$E_{17,10}$	$E_{11,17}$	$E_{17,11}$	
K_7		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
K_8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
K_9	0			0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
K_{10}		0	0																0	0
K_{11}	0	0	0			0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0			
K_{12}	0	0	0	0	0			0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
K_{13}	0	0	0	0	0	0	0			0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
K_{14}	0	0	0	0	0	0	0	0	0			0	0	0	0	0	0	0	0	0
K_{15}	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0			0	0	0	0	0	0	0	0
K_{16}	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0			0	0	0	0	0	0
K_{17}	0			0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0						

возки грузов в транспортном узле. Множество E является вариантами перегрузочных процессов, для которых характерно определенное и конечное местоположение груза. Матрица перемещения грузов в терминалах Западного берега транспортного узла представлена в таблице 2, в терминалах Восточного берега – в таблице 3.

Известны количество приходящих судов, вагонов в порт и время их прибытия, а наличие свободных перегрузочных машин, складов является случайным. Для каждого момента времени t вероятность любого состояния системы в будущем зависит только от ее состояния в настоящем.

Состояния системы соединены между собой связями (переходами из i -го состояния в j -е состояние). Каждый переход характеризуется вероятностью перехода P_{ij} . Вероятность P_{ij} показывает, как часто после попадания в i -е состояние осуществляется затем переход в j -е состояние. Сообразно под состоянием системы управления можно понимать пребывание грузопотока

в одной из вершин графа. Перемещение грузопотока из одного пункта в другой представляет собой изменение состояния системы, то есть на графе это перемещение грузов из K_i в K_j .

Вероятность i -го состояния системы обозначим P_i , условную вероятность перехода из i -го состояния в j -е состояние – как

$$p_{ij} \left(\sum_{i=q}^N p_{ij} = 1 \right).$$

Данная цепь является управляемой цепью Маркова [1]. Тогда вероятность j -го состояния системы вычисляется по формуле:

$$P_j = p_{ij} P_i, i, j = 1, N. \quad (1)$$

Вероятности перехода p_{ij} могут быть представлены матрицей:

$$P = \begin{bmatrix} P_{11} & P_{12} & \dots & P_{1N} \\ P_{21} & P_{22} & \dots & P_{2N} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ P_{N1} & P_{N2} & \dots & P_{NN} \end{bmatrix},$$

где p_{ij} – вероятность перехода за один шаг из состояния i в состояние j ; p_{ii} – вероятность задержки системы в состоянии i .





Матрица P — это квадратичная переходная матрица, элементами которой выступают вероятности перехода из i -го в j -е состояние за один шаг процесса. Статическое состояние системы описывает вероятность состояния $\{P_k\}$ ($k = 1, N$), а динамическое — множество вероятностей всех переходов $\{p_{ij}\}$.

Если начальная вероятность состояния E_i равна a_i , то вероятность того, что система в момент n находится в состоянии E_k , равна

$$a_j^n = \sum_i a_i \cdot p_{ik}^{(n)}. \quad (2)$$

Аналогично, если начальная вероятность состояния E_i равна p_i , то получим

$$p_j^n = \sum_i p_i \cdot p_{ij}^{(n)}. \quad (3)$$

Выражение (3) в определенной степени отражает статические и динамические состояния системы.

Таким образом, описание и моделирование функционирования перегрузочных процессов транспортного узла можно определить через граф-модель и математическую вероятностную модель.

Задача оптимизации управления перегрузочными процессами состоит в следующем: в транспортном узле имеется некоторое число погрузочно-разгрузочных пунктов, количество идентичных транспортных средств и количество грузопотоков, проходящих в системе. Необходимо составить маршрут передвижения каждого грузопотока и транспортного средства внутри транспортного узла, чтобы обеспечить минимум затрат на перевозку грузов и сокращение времени обработки транспортных средств [1, 5].

Дуги графа характеризуются следующими параметрами:

1. g_{ij} — грузопоток по дуге (i, j) .

2. t_{ij} — время перемещения по дуге (i, j) , состоящее из времени обработки грузов пункта i и времени перемещения транспортного средства от пункта i к пункту j .

Продолжительность перемещения транспортного средства рассчитывается по формуле:

$$T_i = t_n + t_y + t_r, \quad (4)$$

где t_n — время пуска механизма, s (принимают 2–8 с); t_y — время установившегося движения, равное отношению пути перемещения к скорости, s ; t_r — время тормо-

жения механизма, s (принимают 2–8 с).

Расчет времени обработки грузов, т.е. времени непосредственного выполнения перегрузочных операций, τ :

$$t_o = t_{cm} - t_{пз} - t_{тп}, \quad (5)$$

где t_{cm} — продолжительность смены; $t_{пз}$ — время подготовительно-заключительных операций, τ ; $t_{тп}$ — время технологических перерывов в работе, τ ;

3. c_{ij} — стоимость перемещения транспортного средства из пункта i в пункт j за единицу груза.

4. d_j — стоимость на погрузочно-разгрузочные работы в j -м пункте за единицу груза.

5. $k_{тп}$ — коэффициент транзита груза через порт $k_{тп} \in [0, 1]$.

6. M — количество идентичных транспортных средств грузоподъемностью q .

7. k — k -е транспортное средство, $k \in M$.

8. p_{ij} — вероятность перемещения k -го транспортного средства от пункта i к пункту j .

9. $[x_i, y_i]$ — «временное окно» (time window) — промежуток времени, в течение которого должен быть обработан груз на i -м пункте.

10. T_i^k — время прибытия k -го транспортного средства к i -му пункту;

11. X_{ijk} — переменная, принимающая значения $\{0, 1\}$ и характеризующая направление движения транспортного средства: $X_{ijk} = 1$ — от пункта i к пункту j , а $X_{ijk} = 0$ — в обратном направлении.

Затраты на перемещение грузопотока g_{ij} k -го транспортного средства можно определить как:

$$C_{ij} = c_{ij} \cdot g_{ij} \cdot p_{ij}^k. \quad (6)$$

Затраты на выполнение погрузочно-разгрузочных работ в j -м пункте за грузопоток g_{ij} при перемещении груза от пункта i к пункту j вычисляются в виде:

$$D_j = d_j \cdot g_{ij} \cdot p_{ij}^k. \quad (7)$$

Комплексные расходы на перемещение грузопотока k -го транспортного средства, позволяющие оптимизировать процесс перегрузки грузов по экономическому критерию — суммарному комплексному расходу, определяются из выражения:

$$R_k = \sum_{k \in M} \sum_{i \in N} \left(\sum_{j \in N} C_{ij} \cdot X_{ij}^k + k_{тп} \sum_{j \in N} D_j \cdot X_{ij}^k \right). \quad (8)$$

Полученное выражение (8) позволяет определить цену маршрутов всех транспортных средств по перевозке грузов внутри транспортного узла [1, 3, 5]. Минимизация (8) реализуется при ограничениях, имеющих в виду, что каждое транспортное средство обслуживается на одном маршруте, а кроме того, что транспортное средство не может перемещать количество грузов большее, чем предполагает его грузоподъемность. Наряду с этим накладываются ограничения по времени (4–5).

При решении задачи оптимизации необходимо учитывать показатели качества транспортной продукции. В рамках исследования к основным качественным характеристикам транспортной продукции будем относить:

- степень ритмичности отправления и прибытия грузов;
- степень регулярности перевозок грузов;
- коэффициент, определяющий уровень скорости доставки грузов;
- степень сохранности перевозимых грузов.

Перечисленные показатели принимают значение от 0 до 1 и вычисляются для отдельных видов транспорта и груза. В отдельности каждый показатель имеет автономное значение, но их систематизация и интеграция дают показатель, который позволяет получить комплексную оценку качества перевозки [4,5]. Он называется «колесом качества» транспортного обслуживания грузовладельцев и вычисляется по формуле:

$$K_0 = \alpha_{оп} K_{оп} + \alpha_p K_p + \alpha_d K_d + \alpha_{сг} K_{сг}$$

где $\alpha_{оп}$, α_p , α_d , $\alpha_{сг}$ – рейтинговые коэффициенты, учитывающие потребительские

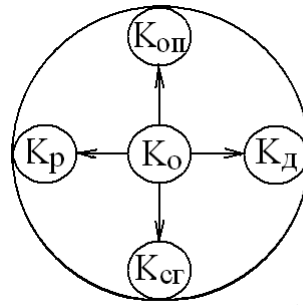


Рис. 3. «Колесо качества» транспортного обслуживания.

оценки отдельных показателей транспортной продукции и их взаимовлияние. Данные коэффициенты получают методом экспертных оценок.

На рис. 3 приведено графическое изображение «колеса качества».

МОДЕЛИРОВАНИЕ В СРЕДЕ MATLAB

Для моделирования полученной граф-модели перегрузочных процессов предлагается использовать пакет Simulink программы Matlab. Simulink – это интерактивная среда для моделирования и анализа широкого класса динамических систем с помощью блок-диаграмм, которые могут быть объединены в составные блоки, что позволяет использовать иерархическое представление структуры модели, тем самым обеспечивая упрощенный взгляд на компоненты и подсистемы.

На рис. 4 представлена модель перегрузочных процессов транспортного узла.

Модель состоит из трех подмоделей, реализованных в качестве отдельных блоков с помощью way 1, way 2 и way 3 (элементы Subsystem). С помощью ключей можно выбирать необ-

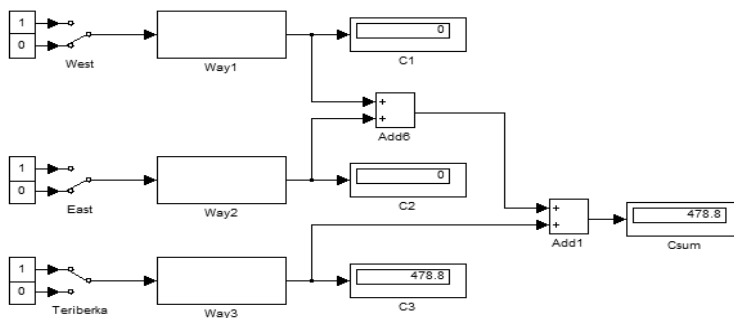


Рис. 4. Граф-модель перегрузочных процессов транспортного узла.



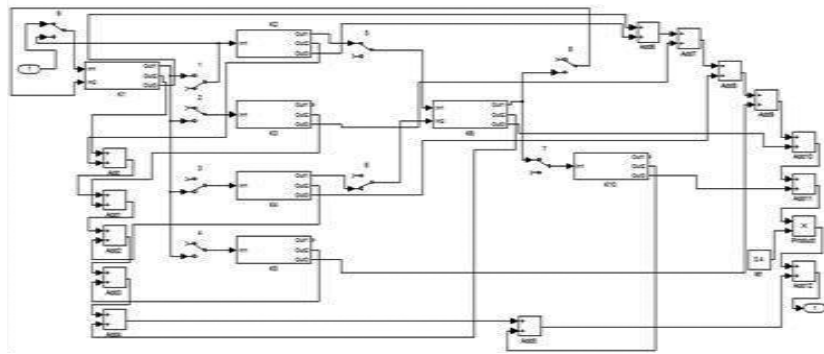


Рис. 5. Подсистема way 1. Модель терминалов западного берега Кольского залива.

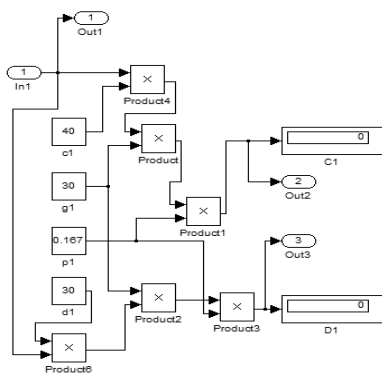


Рис. 6. Подсистема узла K2.

ходимый путь перегрузочных процессов. Блоки сложения суммируют расходы на перегрузочные процессы с учетом коэффициента транзита.

Подсистема way 1, в которой реализована модель терминалов Западного берега, представлена на рис. 5. Путь перегрузочных процессов выбирается с помощью ключей. На выходе из каждого блока предусмотрено суммирование комплексных расходов на перегрузку груза.

Блоки K1–K6, K10 также реализованы в виде отдельных подсистем, пример одной из них на рис. 6. Подсистемы остальных

пунктов погрузки/выгрузки построены аналогичным образом. В качестве входного и выходного сигналов служат In1 и Out1 соответственно, если блок участвует в перегрузочном процессе, то In1 = 1 и Out1 – это значение устанавливается переключением ключа перед блоком. Выходы Out2 и Out3 служат для передачи текущего значения расходов за перегрузку груза, а также передачи стоимости за передвижение транспортного средства.

Подсистема way 2 построена аналогично подсистеме way 1 и представляет собой терминалы восточного берега. Подсистема way 3 представлена на рис. 7.

Результаты моделирования перегрузочных процессов для грузопотока в 30 тонн представлены в таблице 3. Стоимости услуг за перегрузку грузов, а также за передвижение транспортных средств и значения коэффициента транзита указаны приблизительно (в рублях) и размещены на сайте Мурманского морского торгового порта.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рассмотренные в статье подходы к разработке математической модели транспортного узла в виде граф-модели и её аналога –

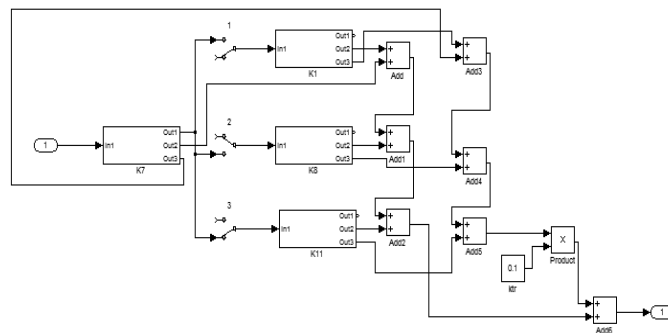


Рис. 7. Подсистема way 3. Модель терминалов западного берега Кольского залива.

Таблица 3

Результаты моделирования перегрузочных процессов

Путь	c_{ij}	pk_{ij}	d_{ij}	$K_{тр}$	Расходы
K1→K2	C_{11}	25	1	20	1251
	C_{12}	40	0,167	30	
K1→K2→K6	$C_{26} = 40$		0,5	30	2031
K1→K2→K6→K10	$C_{6,10} = 10$		0,25	20	2421
K1→K6	$C_{16} = 40$		0,167	30	1190,4
K1→K3	$C_{11} = 100$		1	50	5303
	$C_{13} = 30$		0,167	100	
K1→K4	C_{11}	25	1	10	960,2
	C_{14}	10	0,167	20	
K1→K4→K6	$C_{46} = 20$		0,5	20	1380
K1→K4→K6→K10	$C_{6,10} = 10$		0,25	20	1515
K1→K5	C_{11}	30	1	20	1260
	C_{15}	20	0,167	10	
K6→K10	C_{66}	10	1	10	982,5
	$C_{6,10}$	15	0,25	30	
K7→K1	C_{77}	10	1	20	478,8
	C_{71}	10	0,333	20	
K7→K8	$C_{78} = 15$		0,333	10	518,4
K7→K11	$C_{78} = 10$		0,333	25	489
K11→K12	C_{11}	10	1	20	1163
	C_{12}	40	0,125	30	
K11→K12→K18	$C_{12,18} = 30$		0,5	20	1913
K11→K12→K18→K10	$C_{18,10} = 15$		0,25	30	2250
K11→K13	$C_{11,13} = 40$		0,125	15	1106
K11→K13→K18	$C_{13,18} = 30$		0,5	20	1856
K11→K13→K18→K10	$C_{18,10} = 15$		0,25	30	2194
K11→K14	$C_{11,14} = 30$		0,125	20	1088
K11→K15	$C_{11,15} = 20$		0,125	30	1098
K11→K16	$C_{11,16} = 40$		0,125	15	1106
K11→K17	$C_{11,17} = 17$		0,125	40	1112
K11→K18	$C_{11,18} = 45$		0,125	35	1030
K11→K18→K10	$C_{11,18}$	30	0,125	30	1232,5
	$C_{18,10}$	15	0,25	30	

матричной модели позволяют решать задачу оптимизации различных по содержанию вариантов перегрузки грузов в морском транспортном узле. Используя разработанную в пакете Simulink модель, можно оценить затраты на перегрузочные процессы различными транспортными средствами и методами. С этой точки зрения возникает уже и сама возможность оптимизировать процесс перегрузки грузов по экономическому критерию – суммарному комплексному расходу на перемещение грузопотока.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бережная Е. Е., Бережная В. И. Математические методы моделирования экономических систем: Учеб. пособие. – 2-е изд. – М.: Финансы и статистика, 2006. – 432 с.

2. Лазарев Н. Ф. Перегрузочные процессы в морских портах. Обработка и обслуживание судов. – М.: Транспорт, 1987. – 137 с.

3. Чан Тхи Хыонг, Шуршев В. Ф. Разработка математической модели для решения задач оптимизации управления перегрузочными процессами морского порта // Вестник Астрахан. гос. техн. ун-та. Серия: Управление, вычислительная техника и информатика. – 2011. – № 1. – С. 83–89.

4. Прохоренков А. М., Истратов Р. А. Разработка информационной структуры порта в составе транспортного узла // Сборник научных трудов SWorld. Материалы международной научно-практической конференции «Современные проблемы и пути их решения в науке, транспорте, производстве и образовании 2011». – Выпуск 4. Том 1. – Одесса: Черноморье, 2011. – 94 с. – С. 85–94.

5. Прохоренков А. М., Истратов Р. А. Управление грузопотоками морского порта, входящего в состав транспортного узла // Материалы международной научно-технической конференции «Наука и образование-2012». – Мурманск: МГТУ, 2012 [Электронный ресурс]. – С. 923–927. ●

