

Модель массового обслуживания в системе логистического взаимодействия железной дороги с морским портом

Х.Р. Агиев

Ингушский государственный университет, Назрань

Аннотация: Взаимодействие железной дороги с морским портом формализовано, как система массового обслуживания. Описаны основные подсистемы "вагон-порт" и "судно-порт", дана характеристика соответствующих требований и обслуживающих устройств. Приводится детальное обоснование выбора соответствующих классов моделей массового обслуживания.

Ключевые слова: взаимодействие железной дороги с морскими портами, теория массового обслуживания.

Введение

Транспортное обслуживание, соответствующее общемировым стандартам, может быть достигнуто только при чётком взаимодействии различных видов транспорта. Главная роль отводится при этом комплексу взаимоотношений между железной дорогой и портом, так как через морские порты проходит значительная доля экспортно-импортных грузов. Проблема согласования взаимодействия железной дороги и морского транспорта через порт поднимается многими авторами, при этом одним из основных средств решения проблемы называется построение имитационных моделей и применение теории массового обслуживания [1]. Однако эта проблема авторами зачастую либо лишь упоминается, либо намечаются отдельные этапы ее решения. Поэтому целесообразно построение обобщённой модели на основе теории массового обслуживания [2-4], пригодной для проведения имитационных экспериментов с большим количеством различных факторов [5-7].

Будем рассматривать систему «станция-порт» в рамках двух взаимосвязанных подсистем массового обслуживания:

1) система «вагон-порт» и 2) система «судно-порт».

Подсистема "вагон-порт"

Рассмотрим сначала систему «вагон-порт». Для интерпретации её в качестве системы массового обслуживания (СМО) необходимо выделить основные элементы – требования и обслуживающие устройства. В качестве требований будем рассматривать отдельные вагоны. Требования не будут однородными, поскольку существуют разные типы вагонов, разные роды и типы грузов, разные партии одного и того же груза; кроме того, вагоны могут поступать в порт как на погрузку, так и на выгрузку. С учетом этого каждый вагон будем характеризовать набором

$$\beta = \langle y, g, s, j, m, b, \omega \rangle, \quad y \in Y, g \in G, s \in S, j \in J, m \geq 0, b \in B,$$

где y – тип вагона, Y – множество типов вагонов, рассматриваемых в рамках данной модели; g – род груза, G – множество родов грузов; s – тип груза (наименование), S – множество разных типов грузов; j – номер партии, J – множество номеров партий груза; b – признак, указывающий на тип грузовой операции с данным вагоном (1 – погрузка, 0 – выгрузка, т.е. $B = \{0,1\}$); m – масса нетто груза в вагоне, если вагон поступает на выгрузку, либо масса нетто требуемого к погрузке груза, если вагон поступает на погрузку; ω – тип поезда, с которым прибыл вагон, Ω – множество рассматриваемых типов поездов.

Вагоны поступают на станцию и в порт не по одному, а составами, т.е. в СМО «вагон-порт» входящий поток будет неординарным. Обозначим поток поступления поездов на станцию $\{z_k, k \geq 1\}$. Тогда для задания конкретного потока достаточно задать конечномерные распределения последовательности $\{z_k, k \geq 1\}$, или в случае, когда $\{z_k, k \geq 1\}$ – независимые в совокупности случайные величины – набор функций распределения

$$\{F_{z_k}(t) = P(z_k < t), k \geq 1\}.$$

Обозначим поезд, поступивший в момент времени $t_k = \sum_{l=1}^k z_l$, через γ_k . Тогда, очевидно, $\gamma_k = \{\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_{l_k}\}$, где l_k - число вагонов в поезде γ_k . Число l_k можно рассматривать как случайную, либо как детерминированную величину в рамках разных сценариев с учетом существующих нормативов.

Пусть число путей в парке приема-отправки m_{ad} , число путей в парке отстоя вагонов m_{wt} .

Тогда за суммарную вместимость парка приема-отправки можно принять

$$q_{ad} = \sum_{i=1}^{m_{ad}} v_i,$$

где v_i - вместимость i -го пути приемо-отправочного парка (длина в условных вагонах). Аналогично, суммарная вместимость парка отстоя будет определяться выражением:

$$q_{wt}^0 = \sum_{i=1}^{m_{wt}} w_i.$$

К очереди следует относить только вагоны, адресованные в порт. Вместимость парков на этих станциях определяется выражениями:

$$q_{wt}^j = \sum_{i=1}^{m_{wt}} w_i, j = 1, 2, \dots, N_{st},$$

где j - номер станции, N_{st} - число рассматриваемых прилегающих станций.

Поскольку при обработке в порту вагоны проходят последовательно ряд этапов, целесообразным рассматривать систему «вагон-порт» как сеть из нескольких многоканальных СМО, представляющих собой комбинацию многофазовых и многоэтапных СМО, в каждом блоке которой используются одно или несколько обслуживающих устройств. Порядок прохождения требованием блоков в сети будет определяться технологическим маршрутом для каждого из типов требований.

Рассмотрим подробно блоки, составляющие систему «вагон-порт». Первым блоком в технологическом маршруте любого вагона будут выставочные пути станции. Число одновременно подаваемых на выставочные пути вагонов зависит от вместимости грузовых фронтов, в адрес которых осуществляется подача, вместимости районных парков, при необходимости взвешивания и от длины весового пути, однако длина подаваемой партии не может быть больше длины выставочных путей: $l_{fl} \leq l_{fl}^i$, где l_{fl} - длина партии подаваемых вагонов, а l_{fl}^i - длина выставочного пути, на который осуществляется подача, в условных вагонах. Существует еще ограничение на суммарную массу подаваемой партии: $m_{fl} \leq M_{fl}^i$. Число выставочных путей обозначим через N_{fl} . Каждый выставочный путь i имеет длину l_{fl}^i и, хотя ограничение на массу подаваемой партии вагонов зависит от технологических особенностей самого порта, оно может привязываться к конкретному выставочному пути, поэтому требуется ввести еще характеристику M_{fl}^i - максимальную массу подачи на i -й выставочный путь. С учетом этого данный блок будем рассматривать как многоканальную СМО, в которой обслуживающими устройствами являются отдельные выставочные пути, всего числом N_{fl} . Временем обслуживания поданной партии будем считать время нахождения партии на данном пути, а временем занятости устройства - общее время, включающее подачу партии на данный выставочный путь, время нахождения партии на пути и время уборки с него. Следует заметить, что продолжительность этих операций при прямом и обратном следовании может быть разной. Основными задачами районных парков порта является приближение вагонов к местам непосредственного осуществления грузовых операций, а также выполнение мелкой сортировки, поэтому каждый из районных парков представим в виде двух последовательных блоков.

Первым блоком является приемоотправочный парк, в котором происходит временное накопление вагонов при подаче их к грузовым фронтам и от них, а также обработка (осмотр, учет и т.п.) при поступлении в порт и из порта. Данный блок является одноканальным, поскольку одновременно производится обработка только одной партии вагонов. Временем обслуживания партии будем считать время, затрачиваемое на обработку вагонов в парке, а время занятости будет включать время подачи вагонов по выставочным путям станции в парк приема-отправки и время обслуживания. Данный блок не имеет очереди, поскольку ожидание вагонов на выставочных путях не предусмотрено.

Второй блок, входящий в структуру районного парка, представляет собой парк сортировки вагонов. Этот блок многоканальный, число каналов в нем определяется максимальным числом партий вагонов, с которыми возможно одновременное осуществление сортировочных операций. Обозначим это число $N_{sp}^i, i=1,2,\dots,N_{dp}$. Время обслуживания представляет собой время выполнения сортировки вагонов, время занятости - время подачи их в/из парка и время обслуживания. Данный блок будет иметь очередь, состоящую из вагонов, ожидающих в приемо-отправочном парке, следовательно, ее максимальная длина будет определяться вместимостью путей приемо-отправочного парка, выделенных для движения вагонов в данном направлении. Аналогично с парками на предпортовой станции, определим их вместимость выражениями $q_{dp}^j = \sum_{i=1}^{m_{dp}} u_i$ (для j -го районного парка, u_i - вместимость i -го пути, выделенного для движения в данном направлении).

В качестве следующего блока рассматриваемой системы выделим выставочные пути районного парка. По аналогии с выставочными путями станции, каждый выставочный путь будем рассматривать, как отдельный

канал. Число таких каналов в блоке обозначим $N_{\beta}^i, i=1,2,\dots,N_{dp}$. Время обслуживания представляет собой время нахождения вагонов на путях, а время занятости - время подачи вагонов из районного парка и время обслуживания. Очередь для данного блока будут составлять вагоны, находящиеся в парке приема-отправки.

Центральное место в рассматриваемой системе занимают грузовые фронты, поскольку они во многом определяют состояние всех вышеописанных блоков и служат связующим элементом между складским комплексом и железной дорогой. Каждый вид погрузочно-разгрузочной техники может работать с несколькими грузами и типами вагонов. Поэтому каждую единицу будем характеризовать множеством типов и родов груза, с которыми возможна её работа, а также множеством совместимых с ней типов вагонов: $Y^k \subset Y, G^k \subset G, S^k \subset S$ (индекс k обозначает номер данной единицы техники в рамках данного грузового фронта).

Еще одной существенной характеристикой погрузочно-разгрузочных машин является производительность. Обозначим производительность k -й машины через v_{kgs}^b .

Эта величина имеет смысл массы груза g -го рода s -го типа, обрабатываемой в единицу времени при осуществлении операции $b \in B$. Хотя существуют данные о нормативной производительности погрузочно-разгрузочных устройств, эти величины усредненные, их использование в процессе имитационного моделирования нецелесообразно. Поэтому будем рассматривать v_{kgs}^b как случайные величины с функцией распределения F_{kgs}^b , зависящей от нормативной производительности μ_{kgs}^b и набора некоторых внешних по отношению к модели факторов $\vec{u} = (u_1, u_2, \dots, u_{N_u})$, включающих в себя, к примеру, погодные условия, человеческий фактор и некоторые другие. Вид этой зависимости определим на этапе идентификации модели.

Общее время t_{ij}^b , затрачиваемое данным грузовым фронтом Γ на осуществление грузовых операций b с данной партией вагонов $\tilde{\beta}$, содержащих груз i -го рода j -го типа, определяется суммарной производительностью всех единиц техники, направленных на осуществление операций с данным грузом, и общей массой груза во всех вагонах подачи:

$$t_{ij}^b = \frac{\sum_{\beta \in \tilde{\beta}} (m_{\beta}^{ij} + \kappa_{\beta}^{ij})}{\sum_{k \in \Gamma} v_{kij}^b},$$

где m_{β}^{ij} - масса груза i -го рода j -го типа в вагоне β ; κ_{β}^{ij} - масса тары груза i -го рода j -го типа в вагоне β ; k - номер погрузочно-разгрузочной машины.

Поскольку подаваемая на грузовой фронт партия вагонов обычно состоит из одного вида груза, то величина t_{ij}^b и будет определять время, затрачиваемое на обработку партии данным грузовым фронтом.

Перенастройка машин на другой вид груза происходит один раз в начале процесса обработки данной подачи, но для разных машин может происходить с разной скоростью, поэтому производительность всего грузового фронта $v(t) = \sum_{k \in \Gamma} v_k(t)$ будет уже не постоянной величиной, а ступенчатой функцией со скачками в точках, когда происходит завершение перенастройки очередной машины и включение ее в работу. Следовательно, общее время будет в этом случае определяться выражением вида:

$$t_{ij}^b = \frac{\sum_{\beta \in \tilde{\beta}} (m_{\beta}^{ij} + \kappa_{\beta}^{ij})}{\frac{1}{t_1 - t_0} \int_{t_0}^{t_1} v(t) dt}.$$

Здесь t_0 и t_1 - моменты начала и окончания обработки времени, соответственно. Учитывая ступенчатый характер функции $v(t)$ и тот факт, что $t_1 - t_0 = t_{ij}^b$, получим:

$$t_{ij}^b = \frac{t_{ij}^b \sum_{\beta \in \beta} (m_{\beta}^{ij} + \kappa_{\beta}^{ij})}{\sum_{r=2}^{N_{\Gamma}} (\tau_r - \tau_{r-1}) \sum_{h=1}^{r-1} v_{hij}^b + (t_{ij}^b - \tau_{N_{\Gamma}}) \sum_{h=1}^{N_{\Gamma}} v_{hij}^b},$$

где τ_r - время перенастройки r -й машины с груза рода i_0 типа j_0 на груз i -го рода j -го типа. Машины здесь пронумерованы в порядке увеличения времени перенастройки, так что $\tau_1 \leq \tau_2 \leq \dots \leq \tau_{N_{\Gamma}}$;

N_{Γ} - число погрузочно-разгрузочных машин грузового фронта Γ . Отсюда, можно явно выразить t_{ij}^b :

$$t_{ij}^b = \frac{\sum_{\beta \in \beta} (m_{\beta}^{ij} + \kappa_{\beta}^{ij}) - \sum_{r=2}^{N_{\Gamma}} (\tau_r - \tau_{r-1}) \sum_{h=1}^{r-1} v_{hij}^b}{\sum_{h=1}^{N_{\Gamma}} v_{hij}^b} + \tau_{N_{\Gamma}}.$$

Во время обслуживания подачи также входит время перенастройки в рамках технологического цикла грузовых работ, однако поскольку производительность машин обычно указывается в среднем за весь цикл работ, то эта величина уже входит в v_{hij}^b . Кроме того, в t_{ij}^b также входит время перемещения передвижной техники к грузовому фронту, если этого требует технологический процесс. Обозначим эту величину $\tau_{\text{НГ}}^k$ - время, затрачиваемое на перемещение единицы передвижной техники k от грузового фронта Н к грузовому фронту Γ .

Получим:

$$t_{ij}^b = \frac{\sum_{\beta \in \beta} (m_{\beta}^{ij} + \kappa_{\beta}^{ij}) - \sum_{r=2}^{N_{\Gamma}} (\tau_r + \tau_{\text{НГ}}^r - \tau_{r-1} - \tau_{\text{НГ}}^{r-1}) \sum_{h=1}^{r-1} v_{hij}^b}{\sum_{h=1}^{N_{\Gamma}} v_{hij}^b} + \tau_{N_{\Gamma}} + \tau_{\text{НГ}}^{N_{\Gamma}},$$

Кроме набора и производительности погрузочно-разгрузочных машин, существенной характеристикой грузового фронта является его вместимость. Вместимость грузового фронта Γ определяется вместимостью каждого из его

путей v_i (в условных вагонах), однако в этом случае фактическое число вагонов у грузового фронта является существенным фактором, влияющим на время обслуживания партии, а поэтому определять суммарную вместимость грузового фронта нужно с учетом лишь целого числа вагонов, вмещающихся на каждый из путей. Наконец, следует ввести множество Θ складов, находящихся у данного грузового фронта.

Необходимо отдельно остановиться на продолжительности каждой из технологических операций, связанных с перемещением вагонов из очереди к грузовым фронтам и обратно.

Общее время нахождения вагона в порту t_{port} определяется суммарным временем прохождения всех стадий и операций, связанных с движением вагона в составе партии от выставочных путей к грузовому фронту и обратно и временем осуществления погрузочно-разгрузочных операций.

Время нахождения вагона в порту $t_{port} = \sum_{i=1}^{N_{op}} \tau_i^*$, где N_{op} - общее число учитываемых операций; τ_i^* - время выполнения i -й операции:

τ_1^i , $i = 1, 2, \dots, N_{fl}$ - время нахождения на i -м выставочном пути станции (N_{fl} - число выставочных путей станции);

τ_2^{ij} , $i = 1, 2, \dots, N_{fl}$; $j = 1, 2, \dots, N_{dp}$ - время подачи с i -го выставочного пути станции в парк приема-отправки j -го районного парка (РП) (N_{dp} - РП);

τ_3^i , $i = 1, 2, \dots, N_{dp}$ - время обработки в парке приема-отправки i -го РП перед подачей в сортировочный парк;

$\tilde{\tau}_3^i$, $i = 1, 2, \dots, N_{dp}$ - время ожидания в парке приема-отправки i -го РП;

τ_4^i , $i = 1, 2, \dots, N_{dp}$ - время подачи из парка приема-отправки i -го РП в сортировочный парк или обратно; τ_5^i , $i = 1, 2, \dots, N_{dp}$ - время пребывания в сортировочном парке i -го РП;

τ_6^{ij} , $i = 1, 2, \dots, N_{dp}$; $j = 1, 2, \dots, N_{fl}^i$ - время подачи

из сортировочного парка i -го РП на j -й выставочный путь РП (N_{fl}^i - число выставочных путей i -го РП); $\tilde{\tau}_6^{ij}$, $i=1,2,\dots,N_{dp}$; $j=1,2,\dots,N_{fl}^i$ - время подачи из приемо-отправочного парка i -го РП на j -й выставочный путь РП

(N_{fl}^i - число выставочных путей i -го районного парка); τ_7^i , $i=1,2,\dots,N_{fl}^j$; $j=1,2,\dots,N_{dp}$ - время нахождения на i -м выставочном пути РП; τ_8^{ijk} , $i=1,2,\dots,N_{fl}^j$; $j=1,2,\dots,N_{dp}$ - время подачи с i -го выставочного пути j -го РП на k -й грузовой фронт;

τ_9 - время осуществления погрузочно-разгрузочных операций с поданной на грузовой фронт партией вагонов;

τ_{10}^{kij} - время подачи с k -го грузового фронта на i -й выставочный путь j -го РП; τ_{11}^i , $i=1,2,\dots,N_{fl}^j$; $j=1,2,\dots,N_{dp}$ - время нахождения на i -м выставочном

пути РП при обратном следовании; τ_{12}^{ij} , $i=1,2,\dots,N_{dp}$; $j=1,2,\dots,N_{fl}^i$ - время подачи с i -го выставочного пути j -го РП в парк приемо-отправки;

τ_{13}^i , $i=1,2,\dots,N_{dp}$ - время нахождения в приемо-отправочном парке i -го РП при обратном следовании; τ_{14}^{ij} - время подачи из приемо-отправочного парка

i -го РП на j -й выставочный путь станции; τ_{15}^i ; $i=1,2,\dots,N_{fl}$ - время нахождения на i -м выставочном пути станции при обратном следовании;

τ_{16}^i , $i=1,2,\dots,N_{fl}$ - время уборки с i -го выставочного пути станции. Моментом окончания обслуживания будем считать момент времени, когда вагон покинул выставочные пути и оказался на предпортовой станции, т.е. временем обслуживания требования и будет величина t_{port} .

Связующим элементом между двумя подсистемами, входящими в состав морского порта, является складской комплекс, на котором происходит накопление груза при перевалке его с железнодорожного на морской транспорт и обратно. Каждый склад будем характеризовать набором

$$\mu = \langle \tilde{G}, \tilde{S}, \tilde{J}, V \rangle,$$

где $\tilde{G} \subset G$ - множество родов складированного груза; $\tilde{S} \subset S$ - множество типов складированного груза; $\tilde{J} \subset J$ - множество номеров партий груза, для которых предусмотрено место на складе; V - матрица размера $|\tilde{G}| \times |\tilde{S}| \times |\tilde{J}|$, состоящая из неотрицательных чисел, определяющих максимальную вместимость склада для каждого из допустимых сочетаний род/тип/партия груза. Поскольку обычно в порту существует специализация районов по роду груза, то множество \tilde{G} зачастую одноэлементно.

Подсистема "судно-порт"

Перейдем теперь к описанию второй подсистемы, условно названной «судно-порт». В качестве требований данной системы будем рассматривать суда, приходящие в порт для осуществления грузовых операций. Обслуживающими устройствами для них являются причалы, оборудованные погрузочно-разгрузочной техникой. Как правило, причалы и грузовые фронты для железнодорожных вагонов составляют единый комплекс, оборудованный общим набором техники для обеспечения возможности осуществления грузовых операций по прямому варианту.

Введем набор характеристик для каждого судна:

$\eta = \langle \tilde{G}, \tilde{S}, \tilde{J}, \Phi, l \rangle$. Здесь $\tilde{G} \subset G$ - множество родов перевозимого груза;

$\tilde{S} \subset S$ - множество типов перевозимого груза; $\tilde{J} \subset J$ - множество номеров партий груза; l - длина судна; $\Phi: \tilde{G} \times \tilde{S} \times \tilde{J} \rightarrow R^+ \times B \times N$ - отображение, задающее структуру загрузки судна, т.е. сопоставляющее каждой тройке (g, s, j) тройку (m, b, d) ,

где $m \in R^+$ - масса груза g -го рода s -го типа j -й партии на судне к выгрузке/погрузке, $b \in B$ - тип грузовой операции, $d \in N$ - натуральное число,

задающее абсолютный порядок осуществления грузовой операции с данным грузом.

Поток судов в порт обозначим $\{q_k, k \geq 1\}$.

Как и в случае поездов, для задания конкретного потока достаточно задать конечномерные распределения последовательности $\{q_k, k \geq 1\}$, или, в случае, когда $\{q_k, k \geq 1\}$ - независимые в совокупности случайные величины – набор функций распределения $\{F_{q_k}(t) = P(q_k < t), k \geq 1\}$. Набор характеристик η для каждого судна определяется случайным образом (в пределах физического смысла, разумеется) в соответствии с законами распределения характеристик, вид которых будет определен на этапе идентификации модели.

Каждый причал имеет ограниченную длину, которая определяет число судов, одновременно находящихся у него под грузовыми операциями. Обозначим длину причала $l_{ber}^i, i = 1, 2, \dots, N_{ber}$, где N_{ber} - число причалов в порту. Производительность причального фронта определяется суммарной производительностью машин, участвующих в осуществлении погрузочно-разгрузочных операций с судами $v_{ber} = \sum_{k=1}^{N_{ber}} v_k$, где N_{ber} - число таких машин (индексы, обозначающие тип и род груза, направление грузовой операции опущены для удобочитаемости). Общее время осуществления грузовых операций типа b с судном по данному виду груза определяется выражением:

$$t_{gs}^b = \frac{\sum_{j \in J} (m_j^{gs} + n_j^{gs}) - \sum_{r=2}^{N_{ber}} (\tau_r + \tau_{НГ}^r - \tau_{r-1} - \tau_{НГ}^{r-1}) \sum_{h=1}^{r-1} v_{hgs}^b}{\sum_{h=1}^{N_{ber}} v_{hgs}^b} + \tau_{N_{ber}} + \tau_{НГ}^{N_{ber}},$$

а общее время осуществления грузовых операций:

$$t_{car} = \sum_{b \in \tilde{B}} \sum_{g \in \tilde{G}} \sum_{s \in \tilde{S}} t_{gs}^b.$$

Для нахождения общего времени обслуживания судна необходимо добавить суммарное время ожидания груза у причала

$$t_{awt} = \sum_{j \in \tilde{J}} \sum_{g \in \tilde{G}} \sum_{s \in \tilde{S}} t_{awt}^{gsj}$$

и время перестановок между причалами t_{tr} .

Заключение

Теория массового обслуживания предоставляет наиболее адекватный математический аппарат для описания интермодальных перевозок. Поэтому в статье предложена модель логистического взаимодействия в системе "железная дорога - морской порт" как система массового обслуживания.

В то же время, организация логистического взаимодействия железнодорожных станций с морскими портами представляет собой не столько инженерно-технологическую, сколько организационно-экономическую проблему. Необходима разработка адекватных экономических механизмов управления, учитывающих интересы всех участников указанного взаимодействия, в том числе, надзорных органов. Поэтому в дальнейшем предполагается построение и исследование таких механизмов с использованием аппарата теории активных систем [8-10].

Литература

1. Жуков В.А., Черняев А.Г., Зубков В.Н., Голубева Е.В. Южный регион: повышение эффективности интермодальных перевозок. Железнодорожный транспорт, 2004, №12, с.12-20.
2. Gross D., Harris C.M. Fundamentals of Queueing Theory. Wiley, 1998. 500 p.
3. Kleinrock L. Queueing Systems: Volume I. Theory. Queueing Systems. Volume II Computer Applications. N.Y.: Wiley Interscience, 1976. 382 p.

4. Lazowska E.D., Zahorjan J., Graham G.S., Sevcik K.C. Quantitative System Performance: Computer System Analysis Using Queueing Network Models. Prentice Hall, Inc., 1984. 417 p.
5. Law A.M., Kelton W.D. Simulation Modeling and Analysis. McGraw Hill, 1991. 830 p.
6. Borshchev A., Grigoriev I. The Big Book of Simulation Modeling: Multimethod Modeling with Any Logic 8. Kindle Edition, 2018. 316 p.
7. Ougolnitsky G.A., Usov A.B. Computer Simulations as a Solution Method for Differential Games, Computer Simulations: Advances in Research and Applications. Eds. M.D. Pfeffer and E. Bachmaier. N.Y.: Nova Science Publishers, 2018. p. 663-106.
8. Novikov D. Control Methodology. N.Y.: Nova Science Publishers, 2013. 76 p.
9. Mechanism Design and Management: Mathematical Methods for Smart Organizations, Ed. by Prof. D. Novikov. N.Y.: Nova Science Publishers, 2013. 163 p.
10. Ougolnitsky G. Sustainable Management. N.Y.: Nova Science Publishers, 2011. 287 p.

References

1. Zhukov V.A., Cherniaev A.G., Zubkov V.N., Golubeva E.V. Zheleznodorojniy transport, 2004, №12, с.12-20.
 2. Gross D., Harris C.M. Fundamentals of Queueing Theory. Wiley, 1998. 500 p.
 3. Kleinrock L. Queueing Systems: Volume I. Theory. Queueing Systems. Volume II Computer Applications. N.Y.: Wiley Interscience, 1976. 382 p.
 4. Lazowska E.D., Zahorjan J., Graham G.S., Sevcik K.C. Quantitative System Performance: Computer System Analysis Using Queueing Network Models. Prentice Hall, Inc., 1984. 417 p.
-



5. Law A.M., Kelton W.D. Simulation Modeling and Analysis. McGraw-Hill, 1991. 830 p.
6. Borshchev A., Grigoriev I. The Big Book of Simulation Modeling: Multimethod Modeling with AnyLogic 8. Kindle Edition, 2018. 316 p.
7. Ougolnitsky G.A., Usov A.B. Computer Simulations as a Solution Method for Differential Games, Computer Simulations: Advances in Research and Applications. Eds. M.D. Pfeffer and E. Bachmaier. N.Y.: Nova Science Publishers, 2018. pp. 63-106.
8. Novikov D. Control Methodology. N.Y.: Nova Science Publishers, 2013. 76 p.
9. Mechanism Design and Management: Mathematical Methods for Smart Organizations, Ed. by Prof. D. Novikov. N.Y.: Nova Science Publishers, 2013. 163 P.
10. Ougolnitsky G. Sustainable Management. N.Y.: Nova Science Publishers, 2011. 287 p.

