УДК 656. 614

METHODICAL PROVISIONS FOR DETERMINATION OF NUMBER OF OPERATORS IN SERVICE ERGATIC SYSTEMS DEVELOPMENT STRATEGY

МЕТОДИЧЕСКИЕ ПОЛОЖЕНИЯ ПО ОПРЕДЕЛЕНИЮ ЧИСЛЕННОСТИ ОПЕРАТОРОВ В СТРАТЕГИИ РАЗВИТИЯ СЕРВИСНЫХ ЭРГАТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

I. M. Petrov, *Ph.D, Professor ONMA, Deep Sea Captain*
И. М. Петров, *к.т.н., профессор ОНМА, к.д.п.*

National University «Odessa Maritime Academy», Ukraine
Национальный университет «Одесская морская академия», Украина

ABSTRACT

The technique which based on Markov’s model for the probabilistic assessment of operators number in service ergatic systems according to number of the vessels arrivedfor processing to the port and formedqueues for service in some situations is developed. The offered technique considers specialization of the agencies and the operators involved in it.

Keywords: human resource management, service ergatic system, service company, sea agent, operator, queues for service, system of mass service, intensity of receipt, intensity of service, discipline of service.

Постановка проблемы в общем виде и её связь с важными научными или практическими результатами

В соответствии со стратегией развития компаний, в том числе и сервисных, в кратко-, средне- и долгосрочной перспективах, их менеджменту приходится зачастую решать задачи, связанные с управлением персоналом. В настоящей статье в качестве персонала сервисных компаний рассматриваются морские агенты. Как показано в различных исследованиях, в том числе автора, их целесообразно рассматривать как операторов сервисных эргатических систем (СЭС).

В СЭС иногда создаются такие ситуации, когда в наличии оказывается ограниченное число операторов для проведения агентского обслуживания судов, и потому не представляется возможности начать обслуживание немедленно после подачи нотиса. В таких случаях суда образуют очереди на агентское обслуживание. Во всем многообразии конкретных случаев образования очередей существует одна основная проблема: как наиболее точно установить зависимость качества обслуживания от числа операторов, занятых обслуживанием, при том, чтобы вероятность образования очередей судов на обслуживание свелась к минимуму. Понятно, что чем больше операторов вовлечено в процесс обслуживания, тем выше его качество. Однако, с другой стороны, чрезмерное увеличение числа операторов связано с дополнительными материальными затратами. Поэтому на практике обычно устанавливается уровень качества обслуживания, который желательно достичь, после чего определяется минимальное количество операторов, при котором этот уровень может быть достигнут. Полученные при помощи различных методик значения количественного состава операторов должны подлежать корректировке с учетом вероятности образования очередей из судов, ожидающих обслуживания. Таким образом, задача определения длин очередей судов, решение которой позволяет уточнить необходимое количество операторов, является весьма актуальной.

Анализ последних достижений и публикаций, в которых начато решение данной проблемы и выделение нерешенных ранее частей общей проблемы

Для изучения длин очередей в СЭС может быть привлечен математический аппарат теории массового обслуживания (ТМО), по-английски так и называемой "Queueing Theory" – «теория очередей», который представляет собой раздел теории вероятностей. Помимо изучения вопросов, связанных с образованием очередей и определением их длины, целью исследований ТМО является рациональный выбор структуры системы и самого процесса обслуживания на основе изучения потоков требований, поступающих в систему и выходящих из неё, а также длительности ожидания заявок [1].

Теоретические основы ТМО впервые были разработаны советским математиком А. Я. Хинчиным. Первые практические приложения ТМО относились к задачам функционирования телефонной связи в Копенгагене, и были внедрены Агнером Эрлангом в 1908 - 1922 гг.

С точки зрения разработки теории ТМО значительных результатов добились отечественные математики Хинчин А. Я., Канторович Л. В., Колмогоров А. Н., Айвазян С. А., Гнеденко Б. В., Коваленко Н. И., Бусленко Н. П., Белоцерковский Д. Л., Вентцель Е. С., Бронштейн О. И., Овчаров Л. А., Башарин Г. П., Ивченко Г. И., Лифшиц А. П., Мальц Э. А., Бочаров П. П., Толмачев А. Л., Каштанов В. А., Матвеев В. Ф., Ушаков В. Г. и другие.

Разработке вопросов теории и практики ТМО посвятили свои труды зарубежные ученые Пирсон А., Таха Х., Саати Т., Пальма П., Клейнрок Л., Кокс Д.Р., Смит У.Л., Браун Р.Г., Джексон Дж. Р., Бендат Дж., Бир Ст., Кофман А., Крюон Р., Моррис У.Т. и другие ученые.

На морском транспорте с успехом используются результаты исследований Воевудского Е. Н., Савина В. И, Постана М. Я., Махуренко Г. С., Шибаева А. Г., Козырева В. К., Яценко В. А., Ландера И. И., Гаськова Л. М., Падни А. А., Горбатого М. М., Ирхина А. П., Зубкова М. Н., Климова Г. П. и других.

Как показывает перечень персоналий и основываясь на проведенном автором анализе некоторых из их трудов, может быть сделан вывод о том, что в случае правильной формализации сформулированной задачи, аппарат ТМО позволит получить адекватные её решения.

Формулирование целей статьи (постановка задачи)

Объект, предмет и цели задачи, решаемой в данной статье, могут быть сформулированы следующим образом:

Объект исследования: Сервисная эргатическая система (СЭС) обеспечения производственной деятельности морских транспортных средств.

Предмет исследования: Разработка методов определения дополнительного числа агентов, как операторов СЭС, при образовании очереди из судов.

Цель исследования: Оптимизация численности операторов СЭС с учетом возможного образования очередей из судов, номинированных на обслуживание конкретной агентской компанией.

Изложение материала исследования с обоснованием полученных научных результатов

Для адекватной формализации поставленной задачи и её решения рассмотрим производственный процесс, включающий такие элементы, как прибытие судна в порт, ожидание постановки к причалу, собственно обслуживание, оформление отхода, отход в рейс. Все элементы образуют сервисную эргатическую систему. Далее под обслуживанием судна в порту будем понимать все его виды, такие как агентское, экспедиторское, стивидорное, тальманское, сюрвейерское, шипчандлерское и некоторые другие виды, носящие не регулярный характер, а проводимые эпизодически. Соответственно принятой практике, все указанные виды обслуживания, в том числе формализуемое нами агентское в рамках СЭС, проводятся параллельно с грузовой обработкой судна. Основными условиями постановки судна к причалу «сходу» является его незанятость другим судном и наличие груза, готового к погрузке. При наличии этих условий, как показывает практика, судно будет обслуживаться. Хотя могут допускаться исключения, и обслуживание может быть начато с опозданием. Для агентского обслуживания основная причина этого - недостаток агентов или занятость имеющихся на других судах.

Таким образом, в отдельные периоды времени суда, прибывшие в порт под обработку (и обслуживание) швартуются к причалу сразу же, а в отдельные периоды времени на рейде вынуждены ожидать освобождения причала, образуя при этом очереди.

По мере освобождения причалов диспетчерская служба порта «дает добро» на постановку к причалу. Согласно хорошей морской практике, первыми на обслуживание порт принимает те суда, которые первыми прибыли и подали нотис.

Требуется сделать замечание о правомерности принятого принципа очередности обслуживания судов в портах.

Нужно заметить, что общепринятая мировая практика придерживается принципа: “Первый прибыл – первый обслужен”, “Firstcome–firstserved” (англ.), “Lepremierestvenu - lepremierestservi” (фр.), который, как правило, закреплен в обычаях почти всех портов мира [2]. Это правило - принцип составляет п. 1 ст.76 КТМ Украины. Исключение сделано только для аварийных судов, которые обслуживаются вне очереди, и линейных, обслуживание которых осуществляется в соответствии с объявленным расписанием линий. В «Правилах плавания и лоцманской проводки судов в северо-западной части Черного моря, Бугско-Днепровско-лиманском и Херсонском морском канале» (приказ Минтранссвязи от 01.08.2007 № 655, п. 2.4.4) для «иных судов» очередность обслуживания наступает после: аварийных судов и судов, идущих для оказания помощи; кораблей и судов ВМС Украины; пассажирских судов, работающих по расписанию; судов со скоропортящимся грузом, с опасным грузом; гидрографических судов во время исполнения ими своих обязанностей.

К сожалению судовладельцев и агентов, из новой редакции КТМ Украины, утвержденной Законом «О морских портах Украины» от 17.05.2012, этот принцип исключен. Но практика показывает, что его действие в портах продолжается, поскольку не противоречит ни законодательным, ни подзаконным актам, а, по сути, соответствует хорошей морской практике. Это дает нам право использовать приведенную модель СМО.

После швартовки и убытия лоцмана судно попадают в сферу деятельности контролирующих организаций, а после получения свободной практики - сервисных компаний, в том числе агентских. Главенствующая роль при этом принадлежит морскому агенту, а в принятых ранее терминах – оператору СЭС.

Вероятностный характер прибытия для обработки судов, а также образования очередей обусловливает необходимость уточнения количественного состава морских агентов, в соответствии с хорошей практикой морского агентирования, специализирующихся на обработке судов конкретных типов, например, пассажирских, наливных, военных кораблей, крупно- и малотоннажных, иностранных и украинских и т.п. Действительно, любой универсальный агент будет действовать менее эффективно, чем агент, приобретший опыт работы и агентирования на специализированных судах.

Это означает, что в рамках конкретной агентской компании агентирование крупнотоннажного химического танкера будет поручено самому опытному агенту, знакомому со спецификой, а, например, национального, принадлежащему Укрречфлоту, - агенту начинающему. Сказанное не относится только к агентам, так называемым water – clerc, которые в основном специализируются на стандартных операциях – сбора комиссии из представителей контролирующих органов, оформлении прихода/отхода, и количество которых легко может быть определено априори.

Переходя к математической постановке задачи, отметим, что при исследовании операций часто приходится сталкиваться с системами, предназначенными для многоразового использования при решении однотипных задач. Возникающие при этом процессы получили название процессов обслуживания, а системы – систем массового обслуживания (СМО). То есть исследуемая СЭС с математической точки зрения может быть представлена как СМО. Главная особенность процессов массового обслуживания – случайность.

При этом имеются две взаимодействующие стороны – обслуживаемая и обслуживающая, образующие, соответственно, две подсистемы.

Для оценки вероятностей состояний рассматриваемой системы могут быть использованы методы теории марковских случайных процессов. При этом для моделирования производственных ситуаций в нашем случае наиболее адекватной является марковская модель с непрерывным временем и счетным множеством возможных состояний. Использование такой модели предполагает соблюдение следующих предпосылок [3]:

- время пребывания рассматриваемой системы в данном состоянии распределено по показательному закону;
- поток событий, под воздействием которого процесс переходит из этого состояния, - простейший.

В работах [4 и др.] доказано, что прибытие транспортных средств в морские порты описывается законом Пуассона, который может рассматриваться как стационарный [5].

Поэтому, в дальнейших рассуждениях будем считать, что вероятность занятости причала в промежутке времени [t_0, $t_0 + t_k$] не зависит от t_0, а зависит только от t_k. и интенсивности входящего потока транспортных средств, то есть поток событий является простейшим. В работе [4]показано, что время обслуживания транспортных средств в морских портах является случайной величиной, распределенной по показательному закону либо закону Эрланга, с параметрами, близкими Пуассоновскому. Кроме того, в [6] при помощи метода Монте-Карло доказано, что погрешность от замены непуассоновских потоков событий пуассоновскими с той же интенсивностью в большинстве случаев не превышает 3 ÷ 5 %, что соответствует точности исходной информации в эксплуатационных задачах.

Таким образом анализ опубликованных работ, многие из которых содержат и практическое обоснование полученных результатов в рамках рассматриваемой деятельности [7,8,9],показал правомерность использования в данной задаче марковской модели.

Переходя к формализации задачи, дадим описание СМО «Агентская компания»:

Каналы обслуживания – агенты конкретной агентской компании. Обозначим их i; i = 1, 2,…, m.

Поток заявок (требований) - прибывающие в порт суда различных типов, принадлежащие разным судовладельцам, номинированные под агентирование конкретной агентской компании. Обозначим j– судно, принадлежащее множеству судов определенных типов G_i, закрепленных за агентом i.

Входяшая заявка выбирается на обслуживание одним из заранее определенных свободных каналов в порядке их поступления.

Для решения задачи определения размеров очереди из прибывших на обслуживание построим систему массового обслуживания «Агентская компания». Множеству возможных состояний нашей СМО соответствуют следующие состояния:

S_0 - все каналы свободны;

S_1 - занят один канал, другие свободны;
S_2 - заняты два канала, другие свободны;
.
.
S_m- заняты все m каналов;
S_{m+1} - заняты все m каналов, одна заявка в очереди;
S_{m+2} - заняты все m каналов, две заявки в очереди;
.
.
.
S_{m+n}- заняты все m каналов, n заявок в очереди.
Это описание соответствует схеме, приведенной на рис. 1.

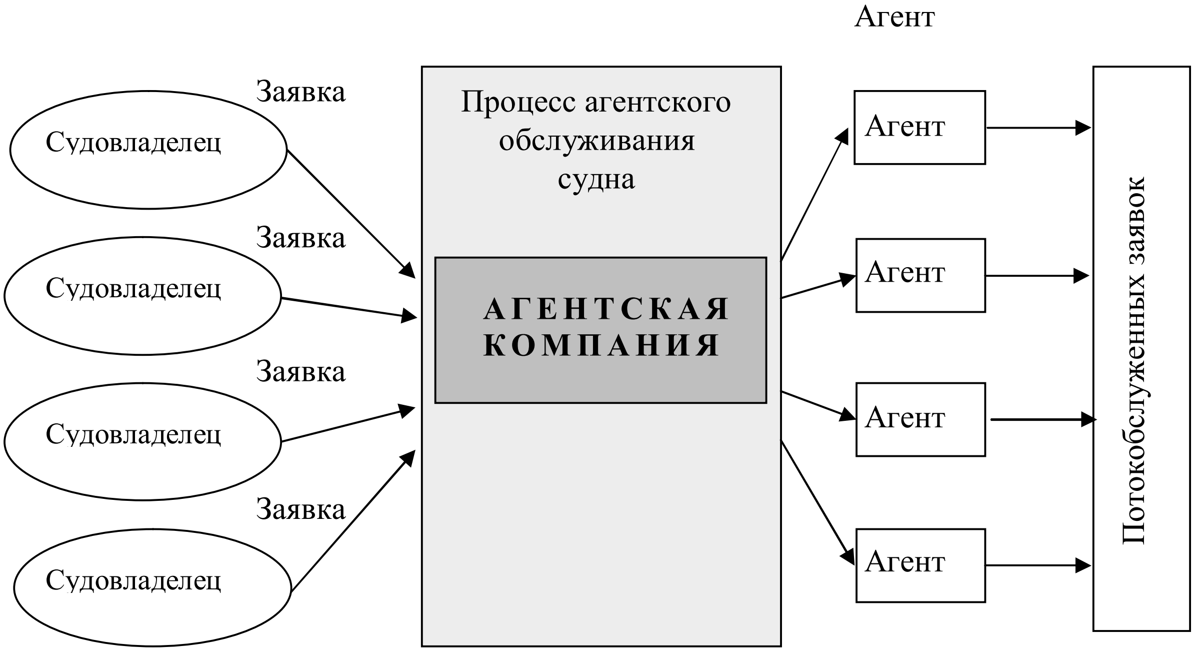

Рисунок 1 - Принципиальная схема системы массового обслуживания «Агентирование судов»

Итак, имеется N_j^c типов заявок, количество заявок в каждом типе $G_i\left(i=\overline{1,m}\right)$. Каждая из них может в некоторые случайные моменты времени нуждаться в обслуживании. Суммарный поток заявок всех типов равномерно распределяется априори по *m* обслуживающим каналам, то есть каждая заявка *j*, отнесенная к одному из каналов *i,* заставая его занятым, становится в очередь на обслуживание.

В пределах очередей заявки обслуживаются по принципу: «первый прибыл – первый обслужен». Обслуживание каждой заявки завершается прежде, чем на обслуживание берется следующая.

Длительности обслуживания заявок различных типов в каждом из *i* равноправных каналов – взаимно независимые случайные величины, одинаково распределенные по показательному закону с функцией распределения $F_j(\tau)$ и средними значениями τ_j, где

$$\tau_j = \int_0^\infty \left[1 - F_j(\tau)\right] d\tau = \int_0^\infty e^{-\mu_j \tau} d\tau = \frac{1}{\mu_j}, \tag{1}$$

где μ_j - интенсивность обслуживания j - й заявки.

К каждому каналу заявки поступают на обслуживание в соответствии с пуассоновскими процессами с параметрами $\lambda_j \left(j \in G_i \right)$.

Требуется определить среднюю длину очереди к каналу обслуживания.

Переходи к алгоритму решения задачи, заметим, что по теореме Гнеденко-Марцикевича, интенсивность суммарного потока Λ, равная $\sum_{j=1}^{n} \lambda_j$, также следует пуассоновскому закону, другими словами, по –[10], можно считать, что на вход поступает простейший поток заявок с интенсивностью Λ, а вид заявок разыгрывается после выбора ее из очереди на обслуживание по полиноминальной схеме с вероятностями $\lambda_1/\Lambda, ..., \lambda_n/\Lambda$.

Такой подход позволяет исследовать описанную систему при помощи специального класса марковских процессов – линейчатых марковских процессов, свойства которых, как и алгоритмы получения характеристик эффективности системы, приведены в [11].Применительно к нашей задаче, следуя[12], марковский процесс $\xi(\tau)$, $\tau \geq 0$, описывющий действие системы, может быть определен в следующем фазовом пространстве

$$\Omega = \left\{ (0), (x, j, k), x \geq 0, \, j \in G_i, \, k = 0, \sum_{j=1}^{n} r_j - 1 \right\},$$

где состояние (0) соответствует полностью свободной системе, а состояние (t_{ij}, j, k) означает, что в произвольный момент времени в очереди находится k заявок безотносительно к их виду, на обслуживании находится j-заявка, и ее обслуживание продолжается уже в течении времени t_{ij}.

Исследованию систем с неоднородным потоком заявок посвящены работы [12 и др.]. Основная идея этих работ заключается в расчленении суммарного потока на две составляющие j-ю и дополнительную к j-й, причем характеристики дополнительной берутся средневзвешенными. Предполагается также, что к чистому времени обслуживания каждой заявки j-го типа добавляется время ожидания освобождения системы от ранее прибывших заявок дополнительного потока.

Более простой алгоритм расчета показателей подобных систем, доведенный до численных результатов, приведен в [9].

В соответствии с алгоритмом, среднее число заявок j-го типа, находящихся в очереди, можно рассчитать как математическое ожидание дискретной случайной величины r_j

$$N_{\text{ож}.j} = \sum_{r_j=1}^{R_j} r_j \cdot \tilde{\pi}_{j, r_j}, \tag{2}$$

где r_j - количество заявок j -го типа, которые могут образовывать очередь типа $r_j = 1,2,...,R_j$;

$\tilde{\pi}_{j,r_j}$ - полная вероятность иметь в очереди r_j заявок. Она определяется по формуле

$$\tilde{\pi}_{j,r_j} = \sum_{k=r_j+1}^{k} \binom{k-1}{r_j} \cdot Z_j^{r_j} \cdot \bar{Z}_j^{k-1-r_j} \sum_{j=1}^{n} P_{j,k}\,, \tag{3}$$

$$(j = \overline{1,n};\, r_j = 0,1,...,R_j),$$

где k - количество заявок суммарного потока, которые могут составить очередь $(k = 0,1,...,K)$, где

$$K = \sum_{j=1}^{n} R_j - 1.$$

$Z_j, \bar{Z}_j$ - вероятности соответствующего выбора на обслуживание заявки j -го типа и противоположного события

$$Z_j = \frac{\lambda}{\Lambda}, \tag{4}$$

$$\bar{Z}_j = 1 - Z_j; \tag{5}$$

$\sum_{j=1}^{n} P_{j,k}$ - суммы вероятностей нахождения в системе равно k заявок суммарного потока, из которых одна принадлежит j - му типу при каждом очередном значении $k\left(k = \overline{1,K}\right)$.

Эти вероятности определяются по формулам

$$P_{j,1} = \left(C_{j,1}/\Lambda\right)\left(1 - a_{j,0}\right)\,, \tag{6}$$

$$P_{j,k} = P_{j,k-1} + \frac{1}{\Lambda}\left(C_{j,k} - \lambda_j \sum_{j=1}^{n} P_{j,k-1}\right), \tag{7}$$

В формулах (6) и (7) $\left\{C_{j,k}\right\}$ - постоянные, которые определяются из выражений

$$C_{j,1} = \lambda_j \cdot P_0 / a_{j,0}\,, \tag{8}$$

$$C_{j,k} = \frac{1}{a_{j,0}}\left(\lambda_j \sum_{j=1}^{n} P_{j,k-1} - \sum_{h=1}^{K-1} C_{j,h} \cdot a_{j,k-h}\right),$$

$$\left(k = 2,3,...,K;\; j \in G_i;\; h = \overline{1,k-1}\right) \tag{9}$$

где P_0 - вероятность свободного состояния системы определяется по формуле

$$P_0 = 1 - \sum_{j=1}^{n} \lambda_j \cdot \tau_j\,, \tag{10}$$

$a_{j,k}$ - вероятность прибытия равно k заявок суммарного потока за время облуживания заявки j -го типа

$$a_{j,k} = \int_0^\infty \frac{(\Lambda\tau)^k}{k!} \cdot e^{-\Lambda\tau} dF_j(\tau) \ , \qquad (11)$$

$$(k = 0, 1, ..., K)$$

Используемый алгоритм расчитан для произвольного времени обслуживания заявок. Преобразует подинтегральную функцию $F(\tau)$ с учетом принятых и проверенных предпосылок о показательном распределении времени обслуживания [13] при помощи формулы дифференцирования функций, например, из[14]:

$$dF_j(\tau) = d\left(1 - e^{-\mu_j\tau}\right) = d1 - de^{-\mu_j\tau} = 0 - de^{-\mu_j\tau} = 0 - \mu_j e^{-\mu_j\tau} d\tau = \mu_j e^{-\mu_j\tau} \quad (12)$$

Тогда,

$$\begin{aligned} a_{j,k} &= \int_0^\infty \frac{(\Lambda\tau)^k}{k!} \cdot e^{-\Lambda\tau} \mu_j e^{-\mu_j\tau} d\tau = \frac{\mu_j}{k!} \int_0^\infty (\Lambda\tau)^k \cdot e^{-(\Lambda+\mu_j)\tau} d\tau = \\ &= \frac{\mu_j \Lambda^k}{k!} \int_0^\infty \tau^k \cdot e^{-(\mu_j+\Lambda)\tau} d\tau \end{aligned} \qquad (13)$$

Последний интеграл может быть представлен в виде

$$a_{j,k} = \frac{\mu_j \Lambda^k}{k!\left(\mu_j + \Lambda\right)^{k+1}} \int_0^\infty \left[\left(\mu_j + \Lambda\right)\tau\right]^k = e^{-(\mu_j+\Lambda)\tau} d\left[\left(\mu_j + \Lambda\right)\tau\right] \qquad (14)$$

Этот интеграл может быть рассчитан способом численного интегрирования при помощи таблиц, например, в соответствии с [15]..Однако, еще проще его можно выразить через гамма-функцию $\Gamma(k+1)$ подобно тому, как это приводится в [16]:

$$\Gamma(k+1) = \int_0^\infty u^k \cdot e^{-u} du = k! \qquad (15)$$

(для целых k)

Аналитическое решение позволяет произвести несложные преобразования

$$a_{j,k} = \frac{\mu_j \Lambda^k}{k!(\mu_j + \Lambda)^{k+1}} \cdot k! = \frac{\mu_j}{\Lambda}\left(1 + \frac{\mu_j}{\Lambda}\right)^{-(k+1)} , \qquad (16)$$

что приводит к выводу о том, что поступление заявок за время обслуживания имеет отрицательное биноминальное распределение.

Проведенный анализ статистических данных по агентской компании Инфлот-Ильичевск о количестве судов различных типов, ожидающих агентского обслуживания, а также данных главной диспетчерской порта Ильичевск и проведенного среди ее работников экспертного опроса, показал их близость расчетным показателям, полученных по предлагаемой методике. Это в итоге позволяет сделать вывод об адекватности рассмотренной модели реальным условиям и целесообразности её использования в данном исследовании и в практической деятельности морского агента.

Выводы и перспективы дальнейшей работы по данному направлению

1. Вероятностный характер прибытия и обслуживания судов, а также образования очередей из них, требует уточнения числа операторов в сервисной эргатической системе.
2. Полученные результаты доказали правомерность использования марковской модели.
3. Положительной особенностью разработанной методики является возможность учета специализации агентских компаний и отдельных агентов в зависимости от принадлежности судов к различным типам.

ЛИТЕРАТУРА

1. Теория массового обслуживания//Математический энциклопедический словарь. М.: «Советская энциклопедия», 1988. – С. 327 – 328.
2. Практика морского бизнеса: сборник статей / А. Ницевич,Н.Мельников, В. Лебедев. – Одесса: Фенікс, 2011. – 282 с.
3. Чжун Кай-лай. Однородные цепи Маркова / Чжун Кай-лай. – М.: Мир, 1964. – 352 с.
4. Горбатый М.М. Теория и практика оптимизации производственных мощностей морских портов / М.М. Горбатый. – М.: Транспорт, 1981. – 186 с.
5. Коваленко И.Н. Расчет вероятностных характеристик систем / И.Н. Коваленко. – Киев: Техніка, 1982. – 96 с.
6. Тараканов К.В. Аналитические методы исследования систем / К.В. Тараканов, Л.А. Овчаров, А.Н. Тарышкин.-М.: Сов. Радио, 1974. – 240 с.
7. Воевудский Е.Н. Обобщение формул Эрланга на случай марковских процессов и их применение к решению некоторых задач планирования / Е.Н. Воевудский – Ведомств. науч. сб. Транспортная кибернетика, 1971, вып. 1, С. 38 – 46.
8. Козырев В.К. Агентирование флота в рыночных условиях / В.К. Козырев, И.И. Ландер // Вісник Одеського державного морського університету. Збірник наукових праць. Вип. 4. Одеса: ОДМУ, 1999. – С. 73 – 80.
9. Петров И.М. Метод определения количества грузозахватных устройств, ожидающих ремонта в портовых мастерских / И.М. Петров / Одес. ин-т инж. мор. флота. – Одесса, 1987. – 25 с. Деп. в В/О Мортехинформреклама 11.05.87, № 708 – мф 87.
10. Башарин Г.П. О расчете буферной памяти в вычислительных системах с несколькими входящими информационными потоками / Г.П. Башарин//

Системы упр-я и коммутации: Сб. науч. работ. – М.: Наука, 1965. – С. 44 – 57.

11. Беляев Ю.К. Линейчатые марковские процессы и их приложение к задачам теории надежности / Ю.К.Беляев // Труды VIВсесоюз. совещ. по теории вероят. и мат. стат-ке. Вильнюс: Гос. изд-во полит. и науч. лит- ры Лит. ССР, 1962. – С. 91 – 103.
12. Бочаров П.П. Анализ бесприоритетной однолинейной системы с ограниченной очередью и заявками нескольких видов / П.П. Бочаров // Изв. АН СССР. Сер. техн. кибернетика. – 1970. - № 6. – С. 32 – 46.
13. Воевудский Е.Н. Управление системой обслуживания судов в морских портах / Е.Н. Воевудский. - М.: Транспорт, 1983. – 314 с.
14. Двайт Г.Б. Таблица интегралов и другие математические формулы / Г.Б. Двайт; пер. с англ. Н.В. Леви; Под ред. К.А. Семендяева. – 5-е изд. М.: Наука, 1977. – 224 с.
15. Замечание о вычислении интеграла $\int_0^\infty x^s e^{-x} f(x)dx$ / В.И. Крылов, Н.И. Королев, Н.С. Скобля // Докл. АН БССР, т. III. – Минск: Изд-во АН БССР. – 1959. - № 1. – С. 4 – 10.
16. Рыжиков Ю.И. Управление запасами / Ю.И. Рыжиков. – М.: Наука, 1969. – 343 с.