

О. Н. Яркова, канд. экон. наук, доцент, Оренбургский государственный университет,
yarkova_on@mail.ru

Имитационное моделирование системы обслуживания пассажиров вылетающих рейсов на примере аэропорта «Оренбург»

В работе предложена имитационная модель системы обслуживания пассажиров вылетающих рейсов в аэропорту с учетом многоэтапного характера предполетного обслуживания и неординарности потока пассажиров. Приведено описание алгоритма и программного средства для расчета характеристик эффективности обслуживания пассажиров на этапе регистрации. Поставлена и решена многокритериальная задача оптимизации системы обслуживания в аэропорту пассажиров вылетающих рейсов.

Ключевые слова: имитационное моделирование, система массового обслуживания, обслуживание пассажиров аэропорта, многоэтапная система обслуживания, эффективность обслуживания, групповой поток, интенсивный трафик.

Введение

В работе любого аэропорта для обеспечения его функционирования задействованы многочисленные службы: полиция, таможня, менеджеры, службы технического обслуживания и т. п. Они выполняют разнообразные функции: доставка еды на борт воздушного судна, погрузка и разгрузка багажа, управление терминалами, оформление и контроль документов, техническое обслуживание самолетов и др. Крупные международные аэропорты имеют достаточно сложную структуру обслуживания.

Вопросами повышения эффективности функционирования аэропорта и его подразделений в аспекте обслуживания клиентов занимались многие исследователи с использованием аппарата теории массового обслуживания (ТМО). Как правило, предполагалось, что входной и выходной потоки в системах обслуживания — простейшие. Однако такие предположения нередко не оправдывались [1].

Исследования крупных зарубежных аэропортов выявили значительно более тяжелые режимы обслуживания пассажиропотоков (*heavy traffic*), когда пассажиропоток превращается в групповой, а обслуживание распределено по произвольному закону, что приводит к необходимости применения метода Кендалла [2] и преобразований Лапласа–Стилтьеса.

В результате аналитические решения возможны, но иногда только в операторном виде. Но если обслуживание к тому же обладает «этапностью», а процесс обслуживания имеет точки бифуркации [3], то такие модели, как правило, не имеют аналитических решений в вещественной области, что является дополнительным обоснованием актуальности данного исследования.

На практике обнаружены и другие примеры распределений: в работе [4] показано, что закон распределения времени между поступлениями пассажиров на регистрацию в аэропорту Курумоч, г. Самара, соответствует гамма-распределению.

Исследования такого рода процессов массового обслуживания, как правило, требуют применения методов имитационного моделирования. Отдельная задача — определение характеристик потоков авиапассажиров [5]. Упрощения этих характеристик нежелательны. Например, в [6] представлена имитационная модель процесса обслуживания пассажиров вылетающих рейсов, однако в модели каждая группа пассажиров позиционировалась как единичная заявка и не учитывался многоэтапный характер предполетного обслуживания пассажиров, что затрудняло обеспечение достоверности оптимизации, выполняемой с помощью этой модели. Удачным примером является реальная практическая разработка, доведенная до промышленного применения, — комплексная имитационно-аналитическая модель трехмодальных транспортно-терминальных сетей аэропортов (Санкт-Петербург) [7].

Описание имитационной модели предполетного обслуживания пассажиров в аэропорту Оренбурга

Поставим задачу оптимизации параметров системы обслуживания вылетающих пассажиров на этапе регистрации багажа, предполетной проверки документов и личного досмотра в АП «Оренбург». Входной поток требований в этом случае образуют пассажиры очередного вылетающего рейса, прибывающие в аэропорт на регистрацию перед отправлением.

Для описания входящего потока введем параметр t — «время», представляющий собой реальное время, прошедшее от точки начала отсчета до очередного произошедшего события, например входа пассажира в аэропорт, начала регистрации, конца регистрации и т. п. За точку начала отсчета выберем начало 5-часового интервала до вылета самолета.

Нередко пассажиры прибывают в аэропорт в составе небольшой группы или семьи, поэтому поток вылетающих пассажи-

ров не является ординарным. Отметим также, что для любого момента времени количество прибывших в аэропорт на регистрацию пассажиров одного рейса зависит от количества уже прошедших регистрацию, т. е. поток пассажиров одного рейса является потоком с последствием. Следовательно, такой поток с одного рейса на регистрацию в аэропорту не является простейшим.

Пусть пассажиры прибывают в аэропорт поодиночке или в составе группы (семьи). Будем считать, что все пассажиры имеют одинаковый приоритет и обслуживаются в порядке поступления, что вполне соответствует реальной ситуации, поскольку число VIP-пассажиров незначительно и принципиально не влияет на характеристики системы обслуживания. Будем рассматривать два типа каналов обслуживания. При поступлении в систему группа пассажиров сначала сдает багаж, проходя обслуживающий канал первого типа — стойку приема багажа. Как правило, у пассажиров, вылетающих семьей, багаж общий, и на этапе оформления багажа семью можно рассматривать как одно требование. Затем группа попадает в очередь на обслуживание каналом второго типа — проверка документов и личный досмотр. Каждый член группы при этом проходит обслуживание отдельно, но на одной стойке. После этого пассажир считается обслуженным и ожидает начала посадки (рис. 1). Для обслуживания пассажиров в АП «Оренбург» могут выделяться от одной до пяти стоек каждого типа, в зависимости от рейса. Будем считать, что каналы одного типа обслуживают пассажиров с одинаковой интенсивностью. Прибывшие в аэропорт до начала регистрации пассажиры образуют общую очередь в зоне ожидания. Учтем также в модели долю пассажиров, по различным причинам «отказавшихся» от рейса (не прибывших на регистрацию до момента ее окончания). Время начала и окончания регистрации зависит также от пассажироместности самолета, выполняющего рейс. Кроме того, в связи с технологическим графиком

подготовки воздушного судна к полету регистрация пассажиров должна заканчиваться не менее чем за 20 минут до вылета.

Для определения характеристик функционирования системы обслуживания воспользуемся методом имитационного моделирования в предположении стационарности случайных процессов времени поступления и обслуживания пассажиров.

Анализ показал, что такие случайные величины, как «доля пассажиров, отказавшихся от рейса», «время прибытия пассажира на аэровокзал от момента начала исследования», «длительность обслуживания одной группы пассажиров у стойки оформления багажа», «длительность обслуживания одного пассажира у стойки проверки документов и личного досмотра», не подчиняются известным законам распределения случайных величин. Их моделирование будем осуществлять методом обратной функции распределения, при этом строится эмпирическая функция распределения на основе статистических данных наблюдений за исходными случайными величинами [8]. Случайная величина «количество человек в группе, прибывшей в аэропорт» распределена по закону Пуассона.

Алгоритм имитационного моделирования системы обслуживания пассажиров

1. Работа системы моделируется на интервале $[0, t^{end}]$ ($t^{end} = 300$ мин.), в течение которого существует реальная вероятность поступления требований. Правая граница соответствует моменту вылета рейса по расписанию. В течение интервала времени $[0, t^{nach}]$ происходит накопление требований без их обслуживания; затем происходит обслуживание требований системой из k^{bag} каналов обслуживания багажа и k^{dok} каналов проверки документов и личного досмотра, которое выполняется на интервале времени $[t^{nach}, t^{kon}]$; в течение интервала $[t^{kon}, t^{end}]$ происходит «дообслуживание» и накопление опоздавших требований.

2. В каждом l -м испытании ($l = 1, 2, \dots, L$, где L — общее количество имитаций) в соответствии с законом распределения числа отказавшихся от рейса пассажиров и пассажироместимости самолета N определяется число пассажиров рейса — M_l .

3. Методом обратной функции в соответствии с эмпирическими законами распределения статистических данных генери-

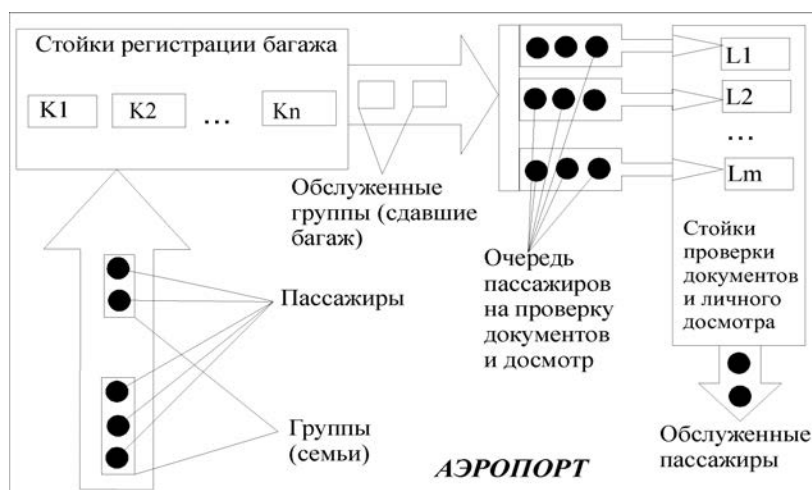


Рис. 1. Схема обслуживания вылетающих пассажиров

Fig. 1. Scheme of service for the departing passengers

руется время входа в систему для каждой группы пассажиров, количество пассажиров в группе, время обслуживания группы на стойке регистрации багажа, время на обслуживание каждого члена группы на стойке проверки документов и личного досмотра.

4. Группы сортируют по времени входа в систему, далее они поступают в очередь к каналам обслуживания, и их обслуживают в порядке *первый пришел — первый обслужен*.

5. В момент начала регистрации, если в системе есть заявки, вошедшие до начала регистрации, то первые k^{bag} групп заполняют каналы обслуживания багажа, остальные ждут в очереди окончания обслуживания. Для каждой группы, ожидающей в очереди, накапливается время ожидания T_j^{och1} . Если в момент окончания обслуживания заявки каналом в очереди нет заявок, то накапливается время простоя каналов обслуживания багажа T_l^{prost1} . Если в очереди есть заявки, то они поступают на обслуживание.

6. После окончания обслуживания каналами оформления багажа группа поступает на обслуживание в систему проверки документов. Если все каналы проверки документов и личного досмотра заняты, то у группы накапливается время ожидания в очереди T_j^{och2} , пока не освободится очередной канал. По окончании регистрации j -й группы фиксируется время пребывания группы в аэропорту до момента окончания ее регистрации T_j^{sum} . В момент окончания регистрации все группы, сдавшие багаж, дообслуживаются. Затем определяется доля необслуженных заявок в l -м испытании D_l^{neobsl} — доля пассажиров, прибывших в аэропорт после срока окончания регистрации багажа.

7. Вычисляются средние значения характеристик для l -го испытания, при фиксированных значениях $k^{dok}, k^{bag}, t^{nach}, t^{kon}$:

- среднее время простоя каналов обслуживания багажа для l -го испытания

$$\begin{aligned} \overline{T}_l^{prost1}(k^{bag}, t^{nach}, t^{kon}) &= \\ &= T_l^{prost1}(k^{dok}, k^{bag}, t^{nach}, t^{kon}) / k^{bag}; \end{aligned}$$

- среднее время простоя каналов проверки документов и личного досмотра для l -го испытания

$$\begin{aligned} \overline{T}_l^{prost2}(k^{dok}, k^{bag}, t^{nach}, t^{kon}) &= \\ &= T_l^{prost2}(k^{dok}, k^{bag}, t^{nach}, t^{kon}) / k^{dok}; \end{aligned}$$

- среднее время пребывания группы в аэропорту от момента входа в аэропорт до момента окончания ее регистрации для l -го испытания

$$\begin{aligned} \overline{T}_l^{sum}(k^{dok}, k^{bag}, t^{nach}, t^{kon}) &= \\ &= \frac{T_l^{sum}(k^{dok}, k^{bag}, t^{nach}, t^{kon})}{M_l^{obsl}(k^{dok}, k^{bag}, t^{nach}, t^{kon})}, \end{aligned}$$

где $M_l^{obsl}(k^{dok}, k^{bag}, t^{nach}, t^{kon})$ — количество обслуженных групп в l -м испытании;

- среднее время пребывания группы в очереди от момента начала регистрации до момента начала обслуживания багажа для l -го испытания

$$\begin{aligned} \overline{T}_l^{och1}(k^{dok}, k^{bag}, t^{nach}, t^{kon}) &= \\ &= \frac{T_l^{och1}(k^{dok}, k^{bag}, t^{nach}, t^{kon})}{M_l^{obsl}(k^{dok}, k^{bag}, t^{nach}, t^{kon})}, \end{aligned}$$

- среднее время пребывания группы в очереди от момента окончания обслуживания багажа до момента начала проверки документов и личного досмотра для l -го испытания

$$\begin{aligned} \overline{T}_l^{och2}(k^{dok}, k^{bag}, t^{nach}, t^{kon}) &= \\ &= \frac{T_l^{och2}(k^{dok}, k^{bag}, t^{nach}, t^{kon})}{M_l^{obsl}(k^{dok}, k^{bag}, t^{nach}, t^{kon})}, \end{aligned}$$

- доля заявок, превысивших приемлемое время ожидания для l -го испытания

$$\begin{aligned} \overline{D}_l^{prev_ogid}(k^{dok}, k^{bag}, t^{nach}, t^{kon}) &= \\ &= \frac{K_l^{prev_ogid}(k^{dok}, k^{bag}, t^{nach}, t^{kon})}{M_l^{obsl}(k^{dok}, k^{bag}, t^{nach}, t^{kon})}, \end{aligned}$$

где $K_l^{prev_ogid}(k^{dok}, k^{bag}, t^{nach}, t^{kon})$ — количество групп в l -м испытании, для которых вре-

мя ожидания в очереди к любому виду каналов превысило заранее заданное критическое время.

8. По результатам всех испытаний рассчитываются характеристики:

- среднее время простоя каналов обслуживания багажа

$$\begin{aligned} \bar{T}^{prost1}(k^{bag}, t^{nach}, t^{kon}) &= \\ &= \sum_{l=1}^L \bar{T}_l^{prost1}(k^{dok}, k^{bag}, t^{nach}, t^{kon}) / L; \end{aligned}$$

- среднее время простоя каналов проверки документов и личного досмотра

$$\begin{aligned} \bar{T}^{prost2}(k^{dok}, k^{bag}, t^{nach}, t^{kon}) &= \\ &= \sum_{l=1}^L \bar{T}_l^{prost2}(k^{dok}, k^{bag}, t^{nach}, t^{kon}) / L; \end{aligned}$$

- среднее время пребывания группы в очереди от момента начала регистрации до момента начала обслуживания багажа

$$\bar{T}^{och1} = \sum_{l=1}^L \bar{T}_l^{och1}(k^{dok}, k^{bag}, t^{nach}, t^{kon}) / L;$$

- среднее время пребывания группы в очереди от момента окончания обслуживания багажа до момента начала проверки документов и личного досмотра

$$\bar{T}^{och2} = \sum_{l=1}^L \bar{T}_l^{och2}(k^{dok}, k^{bag}, t^{nach}, t^{kon}) / L;$$

- среднее время пребывания пассажира в аэропорту до момента окончания ее регистрации

$$\begin{aligned} \bar{T}^{sum}(k^{dok}, k^{bag}, t^{nach}, t^{kon}) &= \\ &= \sum_{l=1}^L \bar{T}_l^{sum}(k^{dok}, k^{bag}, t^{nach}, t^{kon}) / L, \end{aligned}$$

где M_l^{obl} — количество обслуженных заявок в l -м испытании;

- доля пассажиров, время ожидания в очереди для которых превысило заданное критическое значение t_{kr}^{ogid} ,

$$\begin{aligned} \bar{D}^{prev_ogid}(k^{dok}, k^{bag}, t^{nach}, t^{kon}) &= \\ &= \sum_{l=1}^L \bar{D}_l^{prev_ogid}(k^{dok}, k^{bag}, t^{nach}, t^{kon}) / L. \end{aligned}$$

Программная реализация

Описанная имитационная модель реализована в разработанном автором программном средстве «Имитационное моделирование системы обслуживания пассажиров в аэропорту».

Вид основного окна программы представлен на рис. 2.

В окне программы необходимо ввести параметры для расчета со следующими входными данными.

1. Файлы статистических данных наблюдений за случайными величинами: «доля пассажиров, отказавшихся от рейса»; «время прибытия пассажира на аэровокзал от момента начала исследования»; «длительность обслуживания одной группы пассажиров у стойки оформления багажа»; «длительность обслуживания одного пассажира у стойки проверки документов и личного досмотра». К указанным файлам необходимо указать путь через пункт меню «Файл». Каждый файл статистических данных представляет собой текстовый файл, где в первой строке указывается количество данных наблюдений за соответствующей случайной величиной, далее идут наблюдаемые значения случайных величин. Для каждого файла на основе приведенных статистических данных в программе строится аппроксимация эмпирической функции распределения, которая затем используется для генерации случайных величин методом обратной функции.

2. Минимальное и максимальное количество каналов проверки документов и личного досмотра; минимальное и максимальное количество каналов приема багажа; время начала и окончания регистрации багажа; время окончания регистрации пассажиров; пассажироместимость самолета N ; критическое время ожидания в очереди (параметр озна-

Имитационное моделирование системы обслуживания пассажиров аэропорта

Файл Справка

Рассчитать

Количество имитаций	10000		
Количество интервалов	29		
N (вместимость самолета)	140	Начало регистрации	120
Среднее кол-во человек в группе	1,7	Конец регистрации багажа	250
Количество каналов (док) минимум	2	Граница регистрации документов	280
Количество каналов (док) максимум	5		
Количество каналов багаж. минимум	2	Критическое время ожидания в очереди	15
Количество каналов багаж. максимум	5		
Идентификатор файлов	тест 1		

Рис. 2. Основное окно программы

Fig. 2. The main window of program

чает приемлемое для пассажира время ожидания в очереди на регистрацию, задается эмпирически, либо оценивается экспертно, либо путем анкетирования); среднее количество человек в группе, прибывающей в аэропорт на предполетную регистрацию (в программе предполагается пуассоновский закон распределения количества человек в группе).

Необходимо также ввести количество имитаций L (рекомендуется не менее 10 000), количество интервалов (параметр необходим для построения эмпирической функции распределения по введенным статистическим данным) и указать идентификатор файлов (идентификатор будет добавлен в имя файла с результатами вычислений).

Выходные данные: текстовый файл, содержащий для каждого варианта числа каналов обслуживания багажа и числа каналов проверки документов и личного досмотра — количество обслуженных групп; среднее время ожидания в очереди к стойке регистрации багажа; минимальное и максимальное наблюдаемое время ожидания в очереди к стойке регистрации багажа; среднее время, прошедшее с момента входа группы в здание аэропорта до обслуживания на стойке приема ба-

гажа; минимальное и максимальное наблюдаемое время, прошедшее с момента входа группы в здание аэропорта до обслуживания на стойке приема багажа; доля групп, превысивших критическое время ожидания в очереди на обслуживание багажа; среднее время простоя каналов обслуживания багажа; доля необслуженных пассажиров; среднее время ожидания в очереди для проверки документов и личного досмотра; минимальное и максимальное наблюдаемое время ожидания в очереди для проверки документов и личного досмотра; среднее время простоя каналов проверки документов и личного досмотра; доля пассажиров, превысивших критическое время ожидания в очереди на проверку документов и личный досмотр; среднее время, прошедшее с момента входа группы в здание аэропорта до обслуживания на пункте проверки документов и личного досмотра; минимальное и максимальное наблюдаемое время, прошедшее с момента входа группы в здание аэропорта до обслуживания на пункте проверки документов и личного досмотра.

Время расчета варьируется в зависимости от количества имитаций и процессора. К примеру, для процессора AMD FX 6300 с объе-

мом оперативной памяти 8Гб время расчета на каждые 10000 имитаций составляет примерно 59 секунд. Программа сохраняет рассчитанные значения в текстовый файл с маркером, указанным в поле «Идентификатор файлов» в папке с текстом программы. По окончании расчетов программа выдаст сообщение с указанием расположения и имени результирующего файла.

Апробация модели

Для определения достаточного количества имитаций проведем вычислительный эксперимент при следующих фиксированных значениях параметров $k^{dok} = 5$, $k^{bag} = 5$, $t^{nach}_{min} = 150$; $t^{kon} = 260$, $N = 140$, $\lambda^{gr} = 1,7$, $t^{ogod}_{kr} = 15$. Некоторые результаты представлены в табл. 1.

По таблице видно, что 50000 имитаций достаточно для достижения требуемой для анализа точности вычислений.

С помощью разработанного программного средства проведены вычислительные эксперименты при следующих значениях входных параметров: минимальное и максимальное соответственно количество каналов проверки документов и личного досмотра $k^{dok}_{min} = 1$, $k^{dok}_{max} = 5$; минимальное и максимальное соответственно количество каналов приема багажа $k^{bag}_{min} = 1$, $k^{bag}_{max} = 5$; минимальное, максимальное значение и шаг соответственно для времени начала регистрации $t^{nach}_{min} = 120$, $t^{nach}_{max} = 210$, $\Delta t^{nach} = 15$; минимальное, максимальное значение и шаг соответственно для времени окончания регистрации $t^{kon}_{min} = 240$, $t^{kon}_{max} = 280$, $\Delta t^{kon} = 10$, $N = 140$, $\lambda^{gr} = 1,7$, $L = 50000$.

Таблица 1. Значение показателей функционирования системы обслуживания пассажиров в зависимости от количества имитаций

Table 1. The values indicators of passenger service system, depending on the number of simulations

Показатели функционирования системы	Количество имитаций					
	60 000	50 000	40 000	30 000	20 000	10 000
1	2	3	4	5	6	7
Каналов приема документов, ед.	2	2	2	2	2	2
Каналов приема багажа, ед.	5	5	5	5	5	5
Поступление групп (численность группы в среднем), мин.	57,1788	57,1781	57,1795	57,154	57,174	57,182
Среднее время ожидания в очереди (багаж), мин.	3,7696	3,7684	3,7672	3,7611	3,7472	3,7385
Время простоя каналов (багаж), мин.	6,8541	6,8538	6,8537	6,8561	6,8600	6,8561
Доля превышения критического времени (багаж), норм. ¹	0,0196	0,0189	0,0190	0,0190	0,0186	0,0183
Доля необслуженных пассажиров, норм.	0,0929	0,0930	0,0928	0,0929	0,0934	0,0935
Среднее время ожидания в очереди (документы), мин.	71,5171	71,5168	71,5459	71,490	71,279	71,387
Время простоя каналов (документы), мин.	0,0004	0,0004	0,0004	0,0004	0,0004	0,0004
Доля превышения критического времени (документы), норм.	0,5259	0,5257	0,5258	0,5263	0,5261	0,5268
Среднее время до обслуживания (документы), мин.	100,94	100,95	100,98	100,96	100,74	100,86

¹ Изменяется в нормированных безразмерных величинах — числах на интервале от 0 до 1.

Фрагмент таблицы с результатами испытаний представлен в табл. 2.

Постановка многокритериальной задачи оптимизации характеристик системы обслуживания пассажиров вылетающих рейсов

Для повышения качества обслуживания вылетающих пассажиров на аэровокзале потребуем, чтобы время ожидания пассажиром обслуживания в очереди перед стойкой регистрации багажа и проверки документов было не слишком велико. Будем считать приемлемым время ожидания — 15 минут. Однако, учитывая случайный характер времени поступления пассажиров и времени их обслуживания, фактическое время ожидания пассажира в очереди может превысить приемлемое

значение t_{kr}^{ogod} . Потребуем, чтобы доля пассажиров, время ожидания которых превысило 15 минут, было не выше заданного порогового значения. Дополнительно введем ограничение на количество опоздавших на регистрацию пассажиров. Сформулируем задачу оптимизации характеристик функционирования системы обслуживания вылетающих пассажиров: необходимо определить значения числа k^{bag} каналов обслуживания багажа и числа k^{dok} каналов проверки документов и личного досмотра, моментов времени начала t^{nach} и окончания регистрации t^{kon} вылетающих пассажиров самолета пассажироместимостью N , обеспечивающих минимум суммарных затрат рабочего времени, минимум времени нахождения пассажира в аэропорту до окончания регистрации, минимум

Таблица 2. Фрагмент таблицы с результатами испытаний

Table 2. A fragment of the table with test results

Название характеристики	Вариант расчета								
	1	2	3	4	5	...	7	8	9
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Каналов приема документов, ед.	2	2	2	2	3	...	5	5	5
Каналов приема багажа, ед.	2	3	4	5	2	...	3	4	5
Начало регистрации, мин.	120	120	120	120	120	...	210	210	210
Окончание регистрации, мин.	240	240	240	240	240	...	280	280	280
Среднее. время ожидания в очереди (багаж), мин.	7,56	5,19	3,63	2,72	6,59	...	13,76	9,88	7,60
Время простоя каналов (багаж), мин.	3,17	5,25	7,28	9,20	3,21	...	0,41	1,18	1,98
Доля превышения критического времени (багаж), норм.	0,21	0,10	0,03	0,01	0,18	...	0,43	0,30	0,20
Доля необслуженных пассажиров, норм.	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16	...	0,04	0,04	0,04
Среднее время ожидания в очереди (документы), мин.	57,67	57,86	57,85	58,07	27,26	...	18,40	20,64	21,90
Время простоя каналов (документы), мин.	0,01	0,01	0,01	0,00	0,02	...	0,01	0,01	0,01
Доля превышения критического времени (документы), норм.	0,52	0,52	0,52	0,52	0,48	...	0,44	0,45	0,45
Среднее время до обслуживания (документы), мин.	81,54	80,42	79,47	79,15	50,62	...	76,53	76,16	76,05

времени нахождения пассажиров в очереди при условии, что доля пассажиров, ожидающих в очереди более 15 минут, время простоя и доля необслуженных заявок не превышают заданных пороговых значений $D_{kr}^{prev_ogid}$, T_{kr}^{prost} , D_{kr}^{neobl} соответственно:

$$S^{zatr}(k^{dok}, k^{bag}, t^{nach}, t^{kon}) = (k^{dok} + k^{bag})(t^{nach} - t^{kon}) \rightarrow \min \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \bar{T}^{och}(k^{dok}, k^{bag}, t^{nach}, t^{kon}) &= \\ &= \bar{T}^{och1}(k^{bag}, t^{nach}, t^{kon}) + \\ &+ \bar{T}^{och2}(k^{dok}, k^{bag}, t^{nach}, t^{kon}) \rightarrow \min \end{aligned} \quad (2)$$

$$\bar{T}^{sum}(k^{dok}, k^{bag}, t^{nach}, t^{kon}) \rightarrow \min \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \bar{T}^{prost}(k^{dok}, k^{bag}, t^{nach}, t^{kon}) &= \\ &= \bar{T}^{prost1}(k^{bag}, t^{nach}, t^{kon}) + \\ &+ \bar{T}^{prost2}(k^{dok}, k^{bag}, t^{nach}, t^{kon}) \leq T_{kr}^{prost}, \end{aligned} \quad (4)$$

$$\bar{D}^{prev_ogid}(k^{dok}, k^{bag}, t^{nach}, t^{kon}) \leq D_{kr}^{prev_ogid}, \quad (5)$$

$$\bar{D}^{neobl}(k^{dok}, k^{bag}, t^{nach}, t^{kon}) \leq D_{kr}^{neobl}, \quad (6)$$

$$k^{dok} = k_{min}^{dok}, k_{min}^{dok} + 1, \dots, k_{max}^{dok}, \quad (7)$$

$$k^{bag} = k_{min}^{bag}, k_{min}^{bag} + 1, \dots, k_{max}^{bag}, \quad (8)$$

$$t^{nach} = t_{min}^{nach}, t_{min}^{nach} + \Delta t^{nach}, \dots, t_{max}^{nach}, \quad (9)$$

$$t^{kon} = t_{min}^{kon}, t_{min}^{kon} + \Delta t^{kon}, \dots, t_{max}^{kon}, \quad (10)$$

где S^{zatr} — суммарные затраты рабочего времени;

$\bar{T}^{sum}$ — среднее время нахождения пассажира в аэропорту до окончания регистрации;

$\bar{D}^{neobl}$ — доля необслуженных пассажиров;

$\bar{D}^{prev_ogid}$ — доля пассажиров, ожидающих в очереди более t_{kr}^{ogid} минут;

$\bar{T}^{prost}$ — среднее время простоя каналов;

$\bar{T}^{och}$ — общее время нахождения группы пассажиров в очередях;

$k_{min}^{dok}, k_{max}^{dok}$ — минимальное и максимальное соответственно количество каналов проверки документов и личного досмотра;

$k_{min}^{bag}, k_{max}^{bag}$ — минимальное и максимальное соответственно количество каналов приема багажа;

$t_{min}^{nach}, t_{max}^{nach}, \Delta t^{nach}$ — минимальное, максимальное значения и шаг соответственно для времени начала регистрации;

$t_{min}^{kon}, t_{max}^{kon}, \Delta t^{kon}$ — минимальное, максимальное значения и шаг соответственно для времени окончания регистрации.

Сведем многокритериальную оптимизационную задачу (1) — (10) к однокритериальной:

$$\begin{aligned} F(k^{dok}, k^{bag}, t^{nach}, t^{kon}) &= \\ &= \alpha_1 \frac{S^{zatr}(k^{dok}, k^{bag}, t^{nach}, t^{kon}) - S_{min}^{zatr}}{S_{max}^{zatr}} + \\ &+ \alpha_2 \frac{\bar{T}^{och}(k^{dok}, k^{bag}, t^{nach}, t^{kon}) - \bar{T}_{min}^{och}}{\bar{T}_{max}^{och}} + \\ &+ \alpha_3 \frac{\bar{T}^{sum}(k^{dok}, k^{bag}, t^{nach}, t^{kon}) - \bar{T}_{min}^{sum}}{\bar{T}_{max}^{sum}} \rightarrow \min \\ &\bar{T}^{prost}(k^{dok}, k^{bag}, t^{nach}, t^{kon}) \leq T_{kr}^{prost}, \\ &\bar{D}^{prev_og}(k^{dok}, k^{bag}, t^{nach}, t^{kon}) \leq D_{kr}^{prev_og}, \\ &\bar{D}^{neobl}(k^{dok}, k^{bag}, t^{nach}, t^{kon}) \leq D_{kr}^{neobl}, \end{aligned}$$

$$k^{dok} = k_{min}^{dok}, k_{min}^{dok} + 1, \dots, k_{max}^{dok},$$

$$k^{bag} = k_{min}^{bag}, k_{min}^{bag} + 1, \dots, k_{max}^{bag},$$

$$t^{nach} = t_{min}^{nach}, t_{min}^{nach} + \Delta t^{nach}, \dots, t_{max}^{nach},$$

$$t^{kon} = t_{min}^{kon}, t_{min}^{kon} + \Delta t^{kon}, \dots, t_{max}^{kon},$$

где $S_{min}^{zatr}, S_{max}^{zatr}$ — минимальное и максимальное значения суммарных затрат рабочего времени;

$\bar{T}_{min}^{sum}, \bar{T}_{max}^{sum}$ — минимальное и максимальное значения времени нахождения пассажира в аэропорту до окончания регистрации;

Таблица 3. Альтернативные стратегии

Table 3. Alternative strategies

k^{dok}	k^{bag}	t^{nach}	t^{kon}	S^{zatr}	$\overline{T}^{prost}$	$\overline{T}^{och}$	$\overline{D}^{prev_og}$	$\overline{T}^{sum}$	$\overline{D}^{neosl}$	F^*
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
4	1	120	280	800	1,69	21,22	0,298	34,53	0,0495	0,27
5	1	120	280	960	2,86	14,65	0,192	28,14	0,0495	0,32
5	1	135	280	870	1,72	18,78	0,257	35,16	0,0497	0,29
5	2	150	280	910	2,63	19,54	0,2859	42,14	0,0422	0,31

$\overline{T}_{min}^{och}, \overline{T}_{max}^{och}$ — минимальное и максимальное значения времени ожидания заявок в очереди; $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ — весовые коэффициенты по каждому из критериев, задаваемые экспертно.

Для определения характеристик функционирования системы обслуживания при каждом фиксированном значении параметров $k^{bag}, k^{dok}, t^{nach}, t^{kon}$ воспользовались описанным выше инструментарием. Весовые коэффициенты заданы экспертно: $\alpha_1 = 0,6; \alpha_2 = 0,3; \alpha_3 = 0,1$, пороговые значения для ограничений также заданы экспертно: $D_{kr}^{prev_ogid} = 0,35, T_{kr}^{prost} = 10$ минут, $D_{kr}^{neosl} = 0,07$.

В результате получено решение: $k^{dok} = 4, k^{bag} = 1, t^{nach} = 120$ минут, $t^{kon} = 280$ минут. В соответствии с оптимальной стратегией необходимо 4 стойки проверки документов, 1 стойка приема и оформления багажа, начало регистрации за 3 часа до вылета, время окончания регистрации за 20 минут до вылета.

Учитывая, что значения характеристик найдены методом имитационного моделирования и зависят от числа имитаций, рассмотрим стратегии, для которых значение целевого критерия с заданной точностью $\varepsilon = 0,05$ не отличается от минимального значения критерия эффективности. Результаты представлены в табл. 3.

К примеру, в соответствии с четвертой стратегией необходимо 5 стоек проверки документов, 2 стойки приема и оформления багажа, начало регистрации за 2,5 часа до вылета, время окончания регистрации за 30 минут до вылета.

Заключение

В результате выполненного исследования построена имитационная модель процесса обслуживания вылетающих пассажиров, учитывающая групповой характер поступления заявок и двухэтапный принцип их обслуживания.

Достоинство модели — ее приближение к реальным ситуациям, которые происходят в аэропортах: отказы некоторых пассажиров от полета, дообслуживание пассажиров.

Выполнена постановка многокритериальной задачи оптимизации характеристик системы обслуживания пассажиров вылетающих рейсов, которая решена с помощью созданной модели. В результате получены полезные практические рекомендации, например по количеству стоек проверки документов, стоек приема и оформления багажа, по времени начала регистрации и времени окончания регистрации во временной привязке к моменту вылета.

Разработанный программный продукт, в рамках которого работает модель, в перспективе может стать прототипом модуля, встраиваемого в интеллектуальную объектно-ориентированную систему поддержки принятия решений [9].

От редакции

В настоящее время в международных аэропортах России задача совершенствования оперативно принимаемых решений является актуальной. Современный аэропорт исполь-

зует функционально связанные службы, в том числе:

а) диспетчерскую службу воздушного движения;

б) службы обеспечения воздушных судов на аэродроме (заправка топливом, предполетная подготовка);

в) метеослужбу аэродрома;

г) службы обеспечения посадки и высадки пассажиров;

д) службы погрузки и разгрузки грузовых отсеков воздушных судов;

е) службы обеспечения пассажиров питанием на борту судна.

Наиболее ответственной в аспекте безопасности полетов является служба управления воздушным движением, которая должна обладать способностью выбирать необходимую информацию из большого объема сообщений, а также иметь возможность дополнительной пространственной имитации, позволяющей правильно представлять положение бортов в воздушном пространстве и прогнозировать их положение через определенное время в течение полета. Однако эта служба не может в полной мере выполнять свои функции без взаимодействия с другими службами.

Редакция планирует в развитие данной статьи публикацию в одном из ближайших выпусков материалов о принятии решений с учетом следующих особенностей аэропорта:

1) количество одновременно используемых взлетно-посадочных полос;

2) пропускная способность каждой полосы и их приоритетность;

3) возможность по одновременной заправке топливом воздушных судов;

4) возможность по одновременной подготовке к полету нескольких судов;

5) возможность длительной стоянки (дни, недели) на поле аэродрома;

6) возможность одновременного пребывания в воздухе в зоне аэропорта нескольких бортов и ожидания «на круге» в зависимости от трафика и погоды.

Список литературы

1. Саати Т. Л. Элементы теории массового обслуживания и ее приложения. М.: Librokom. 2010. — 520 с.
2. Кендалл Д. Стохастические процессы, встречающиеся в теории очередей, и их анализ методом вложенных цепей Маркова // Математика (ИЛ). М.: Мир. 1959. № 6. С. 97–111.
3. Булыгина О. В., Емельянов А. А. Синергия и эволюция информационных систем в управлении холдингом // Прикладная информатика. 2016. Т. 11. № 2 (62). С. 85–98.
4. Романенко В. А. Исследование процессов обслуживания пассажиров в международном аэропорту Курумоч // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета им. академика С. П. Королева (национального исследовательского университета). 2006. № 3 (11). С. 35–43.
5. Крыжановский Г. А., Палагин Ю. И. Имитационная модель для определения характеристик пассажиропотоков в интермодальной транспортной сети // Транспорт: наука, техника, управление. 1998. № 6. С. 23–27.
6. Романенко В. А. Статистическое моделирование процесса обслуживания пассажиров в международном аэропорту Курумоч // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета им. академика С. П. Королева (национального исследовательского университета). 2009. № 2 (18). С. 150–162.
7. Палагин Ю. И., Мочалов А. И., Тимонин А. В. Математическое моделирование и расчет характеристик трехмодальных транспортно-терминальных сетей // Прикладная информатика. 2013. Т. 8. № 2 (44). С. 32–41.
8. Яркова О. Н., Реннер А. Г., Буреш А. И. Моделирование инвестиционного портфеля страховой компании в статике и динамике: монография / под ред. А. Г. Реннера. Самара: Изд-во Самарского научного центра РАН, 2014. — 207 с.
9. Булыгина О. В. Анализ реализуемости инновационных проектов по созданию наукоемкой продукции: алгоритмы и инструменты // Прикладная информатика. 2016. Т. 11. № 4 (64). С. 87–102.

References

1. Saati T. L. *Elements of the queueing theory and its applications*. Moscow, Librokom Publ., 2010. 520 p.
2. Kendall D. Stochastic processes occurring in the theory of queues and their analysis by the method of the imbedded Markov chain. In: *Matematika (IL)*. Moscow, Mir Publ., 1959, no. 6, pp. 97–111 (in Russian).

3. Bulygina O. B., Emelyanov A. A. Synergy and evolution of information systems in the management of the holding. *Prikladnaya Informatika* — Journal of Applied Informatics, 2016, vol. 11, no. 2 (62), pp. 9–22 (in Russian).
4. Romanenko V. A. Analysis of servicing passengers in the international Airport Kurumotch. *Vestnik of the Samara state aerospace university*, 2006, no. 3 (11), pp. 35–43 (in Russian).
5. Kryzhanovsky G. A., Palagin Yu. I. Simulation model to determine the characteristics of passenger traffic in the intermodal transport network. *Transport: science, technics, management*, 1998, no. 6, pp. 23–27.
6. Romanenko V. A. Statistical modeling of the process of serving the leaving passengers at the international Kurumotch airport. *Vestnik of the Samara state aerospace university*, 2009, no. 2 (18), pp. 150–160 (in Russian).
7. Palagin Yu. I., Mochalov A. I., Timonin A. V. Modeling and calculating parameters of three-modal freight terminal networks. *Prikladnaya Informatika* — Journal of Applied Informatics, 2013, vol. 8, no. 2 (44), pp. 32–22 (in Russian).
8. Yarkova O. N., Renner A. G., Buresh A. I. *Modelirovanie investitsionnogo portfelya strahovoi kompanii v statike i dinamike* [Modeling investment portfolio of the insurance company in statics and dynamics]. Edited by A. G. Renner. Samara, SamNC RAN Publ., 2014. 207 p.
9. Bulygina O. B. Analysis of the feasibility of innovative projects for creating high technology products: the algorithms and instruments. *Prikladnaya informatika* — Journal of Applied Informatics, 2016, vol. 11, no. 4 (64), pp. 87–102 (in Russian).

O. Yarkova, Orenburg State University, Orenburg, Russia, yarkova_on@mail.ru

Simulation of passenger service system departing flights from airport (AP Orenburg's for example)

Major international airports have rather complex service structure. Insufficient attention to the management of the airport departments organizing service system has a negative impact on passengers who are facing with the uncomfortable organized control of documents, delays in the inspection of baggage. The article there was proposed the algorithm for the simulation modeling of passenger service systems also was conducted testing model. The model takes into account passengers which are came to the airport individually or as a part of group. At the stage of baggage reception we can view one group of passengers (ex.: family) as a one requirement which passes the first type of channel service. Then group goes to the queue of the service channel of the second type — checking documents and personal inspection. In this case each member of the group is serviced separately. After that the passenger is considered to be serviced and passenger is awaiting the beginning of the planting. Was presented algorithm and software to calculate the characteristics of passenger service at the stage of registration. The article posed and solved the problem of multicriteria optimizing parameters the mass service system of the departing passenger at the stage of registration of luggage, preflight inspection of documents and personal search at the airport «Orenburg». Created simulation model of the mass service system can be used for planning the work of officers serving passengers departing flights at the airports.

Keywords: simulation, queuing system, airport passenger service, multi-stage service system, service effectiveness, group stream, heavy traffic

About author:

O. Yarkova, PhD in Economics, Associate Professor

For citation:

Yarkova O. Simulation of passenger service system departing flights from airport (AP Orenburg's for example). *Prikladnaya Informatika* — Journal of Applied Informatics, 2016, vol. 11, no. 4 (64), pp. 103–114 (in Russian).