

---

УДК 656.7.052

# РАСЧЁТ ПОКАЗАТЕЛЕЙ РЕЗУЛЬТАТИВНОСТИ РАБОТЫ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ВОЗДУШНЫМ ДВИЖЕНИЕМ КАК СИСТЕМЫ МАССОВОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ С ОТКАЗАМИ

И.Н. ШЕСТАКОВ, М.И.ШЕСТАКОВА

**Статья представлена доктором технических наук, профессором Сухих Н.Н.**

Обосновывается возможность исследования системы управления воздушным движением (УВД) как системы массового обслуживания с отказами. Через предельное состояние диспетчерского пункта объясняется понятие отказа. Даются критерии результативности работы системы в рамках теории массового обслуживания. Приводятся результаты расчёта результативности работы.

**Ключевые слова:** система массового обслуживания, боковая навигация.

## Введение

Структура системы УВД представляет собой многофункциональную человеко-машинную (эргодическую) систему [1], состоящую из подсистем, функционирование которых описывают моделью системы массового обслуживания (СМО), в которой моделью потоков заявок на обслуживание являются ВС с информационными потоками, обслуживающим органом – диспетчерский пункт (ДП) УВД. Процессы в такой системе носят случайный характер, в силу того, что выдерживание расписания или заданной пространственно-временной траектории (процедура 4D) нарушается.

Часто неспособность обеспечить требуемую точность боковой навигации объясняется навигационными погрешностями, относящимися к выдерживанию линии пути и определению местоположения ВС. Тремя основными погрешностями являются погрешности определения траектории (PDE), техники пилотирования (FTE) и навигационной системы (NSE). PDE имеет место, когда определенная системой RNAV траектория не совпадает с желаемой траекторией. NSE представляет собой разницу между расчетным и фактическим местоположением воздушного судна. FTE иногда называется погрешностью траекторного управления (PSE), а NSE - погрешностью расчета местоположения (PEE). Считается, что распределение этих погрешностей будет независимым, нулевым средним и гауссовым, вследствие чего распределение суммарной погрешности системы (TSE) также будет гауссовым при стандартном отклонении, равном квадратному корню из суммы квадратов (RSS) стандартных отклонений этих трёх погрешностей  $\sigma_{TSE} = \sqrt{\sigma_{PDE}^2 + \sigma_{FTE}^2 + \sigma_{NSE}^2}$ .

Случайной величиной является также время поступления заявки на обслуживание или точнее – промежуток времени между заявками. Случайным также является время обслуживания заявки.

## Определение понятия отказа системы УВД

Рассмотрим ситуацию, когда в ДП будут возможны отказы в обслуживании по причинам недопустимо высокой интенсивности потока заявок в случаях, когда функционирование элементов системы УВД превышает максимальную загруженность. Понятие «отказ в обслуживании» в УВД вводится искусственно, т.к. в реальности, когда интенсивность полётов превышает пропускную способность, ВС направляются в зоны ожидания, т.е. остаются на обслуживании ДП. Отправку ВС в зону ожидания можно назвать отказом в обслуживании, т.к. ВС «выбивается» из графика. Могут также возникнуть случаи, когда из-за высокой нагрузки авиадиспетчер пропускает развитие конфликтной ситуации и тогда срабатывает (должна сработать) бортовая система предотвращения столкновений в воздухе (TCAS). В этом случае орган УВД не выполнил свою главную функцию - не обеспечил требуемый приемлемый

уровень безопасности полётов. Подобные ситуации возникают тогда, когда система УВД находится в своём запредельном состоянии и тогда вновь поступающее на обслуживание ВС изменяет в худшую сторону условия её работы. Для простоты формулировок дадим следующее определение отказа в обслуживании в УВД. Отказом в обслуживании в УВД будем называть ситуацию, когда эффективность обслуживания вновь вошедшего в зону УВД ВС будет снижена. Наступление отказа в обслуживании – это предельное состояние ДП, при котором эффективность УВД не обеспечивается на должном уровне. Тогда ДП УВД можно представить системой массового обслуживания с отказами.

Анализ функционирования такой системы и оценка её результативности работы методами теории массового обслуживания (ТМО) возможны, если известны характеристики потока требований  $\lambda$ , интенсивности обслуживания заявок  $\mu$  и число обслуживающих органов  $m$  [2]. Интенсивность потока заявок и их обслуживания получают на основании анализа статистических данных о движении ВС. Изначально можно предположить, что поток ВС является простейшим (или стационарным пуассоновским), удовлетворяющим одновременно условиям ординарности, стационарности и отсутствия последействия. «Отсутствие последействия» часто не удовлетворяет исследователей процессов в УВД, но в [3] показано, что в результате суммирования большого числа ординарных, стационарных потоков с практически любым последействием (что часто присуще в УВД) получается поток, сколь угодно близкий к простейшему. Свойство ординарности потока вытекает из положения: вероятность того, что в одно и то же время  $t$  два и более ВС поступят на обслуживание, практически равна нулю, т.к. начало обслуживания будем считать с момента выхода экипажа ВС на связь с диспетчером, что невозможно выполнить двум ВС одновременно.

Будем считать, что характеристики системы УВД в следующий момент времени зависят лишь от её состояния в данный момент времени и не зависят от того, каким образом система пришла в это состояние. Это означает, что поток заявок является ординарным и без последействия. Критериями результативности работы системы УВД и конкретного ДП в рамках ТМО являются:  $P(t)$  - вероятность того, что ВС будет обслужено за время  $t$ ;  $P(\tau)$  - вероятность того, что ВС будет принято на обслуживание в любой момент времени  $t$ ;  $P_{\text{отк}}$  - вероятность отказа в обслуживании;  $Q_o$  - вероятность того, что ВС будет обслужено (относительная пропускная способность системы УВД);  $K_{\text{ср}}$  - среднее число ВС, обслуживаемых диспетчерским пунктом УВД (диспетчером).

#### **Расчёт показателей результативности работы ДП УВД на основе обработки статистических данных**

Авторами были собраны и обработаны статистические данные функционирования службы УВД аэропорта «Пулково». Интенсивность поступления ВС и интенсивность их обслуживания имеют значения:  $\lambda = 3,7 \text{ 1/ч}$ ,  $\mu = 4,7 \text{ 1/ч}$ . Тогда  $\rho = \lambda / \mu = 0,787$ .

Применив модель предельного состояния функционирования ДП УВД, описанную в [4], были рассчитаны значения показателей результативности функционирования системы УВД «Пулково» для различных значений  $n$  - максимально возможного количества ВС, одновременно обслуживаемых диспетчером, что характеризует его способность управлять  $n$  ВС (табл. 1) и для различных значений  $\rho$  (табл. 2).

**Таблица 1**

Показатели результативности работы для различных значений  $n$

Максимально возможное число ВС, одновременно обслуживаемых диспетчером ( $n$ )	1	2	3	4	5
Вероятность отказа в обслуживании ВС ( $P_{\text{отк}}$ )	0,44	0,015	0,037	0,0073	0,0011
Абсолютная пропускная способность ( $Q_{\text{абс}}$ )	2	3,15	3,56	3,67	3,7
Среднеее число заявок, обслуживаемых одним диспетчерским пунктом ( $K_{\text{ср}}$ )	0,44	0,67	0,758	0,781	0,786

**Таблица 2**Показатели результативности работы для различных значений  $\rho$ 

$\rho$	Показатели	$n$				
		1	2	3	4	5
0,1	$P_{\text{отк}}$	0,09	0,005	0,0002	$3,77 \cdot 10^{-6}$	$7,5 \cdot 10^{-8}$
	$Q_o$	0,91	0,995	0,9998	1	1
	$K_{\text{ср}}$	0,09	0,0995	0,1	0,1	0,1
0,5	$P_{\text{отк}}$	0,33	0,077	0,013	0,0016	0,0016
	$Q_o$	0,67	0,923	0,987	0,998	1
	$K_{\text{ср}}$	0,335	0,4615	0,4935	0,499	0,5
1	$P_{\text{отк}}$	0,5	0,2	0,063	0,015	0,003
	$Q_o$	0,5	0,8	0,937	0,985	0,997
	$K_{\text{ср}}$	0,5	0,8	0,937	0,985	0,997
5	$P_{\text{отк}}$	0,83	0,68	0,53	0,4	0,28
	$Q_o$	0,17	0,32	0,47	0,6	0,72
	$K_{\text{ср}}$	0,85	1,6	2,35	3	3,6
10	$P_{\text{отк}}$	0,91	0,82	0,73	0,65	0,56
	$Q_o$	0,09	0,18	0,27	0,35	0,44
	$K_{\text{ср}}$	0,9	1,8	2,7	3,5	4,4

**Выводы**

Из табл. 1 видно, что показатели результативности работы зависят от значений интенсивности потока заявок и обслуживания. Вероятность отказа в обслуживании зависит от максимально возможного количества одновременно обслуживаемых ВС  $n$ . Пропускная способность системы и  $K_{\text{ср}}$  слабо зависят от  $n$ . По табл. 2 можно сделать следующие выводы: с увеличением  $\rho$ , т.е. с увеличением потока заявок и (или) уменьшением времени обслуживания, вероятность отказа возрастает, так, например, при  $\rho=1$  (интенсивность потока заявок равна интенсивности обслуживания) вероятность отказа, равная 0,003, может быть достигнута лишь при условии обслуживания диспетчерским пунктом одновременно пяти самолетов; низкая пропускная способность имеет место уже при  $\rho=1$  и с увеличением  $\rho$  убывает.

**Определение необходимого количества воздушных судов, одновременно находящихся под управлением авиадиспетчера при заданной интенсивности полётов**

Практически важной для системы УВД является задача определения необходимого числа одновременно обслуживаемых диспетчером воздушных судов для обеспечения заданной пропускной способности аэродрома. Эта задача формулируется следующим образом.

*Дано:*  $\lambda$  - интенсивность потока заявок;  $\mu$  - интенсивность обслуживания заявки;  $P$  - вероятность того, что ВС не будет отказано в обслуживании в любой произвольный момент времени  $t$ .  $P$  характеризует пропускную способность.

*Определить:*  $n$  - число ВС, одновременно обслуживаемых диспетчером, которое является предельным и характеризует пропускную способность ДП.

Опираясь на теорию систем массового обслуживания в [1], были получены основные зависимости, описывающие функционирование системы УВД, исходя из которых, алгоритмом определения  $n$  является следующая формула  $P = 1 - \rho^n / \left[ n! \left( 1 + \sum_{k=1}^n \frac{\rho^k}{k!} \right) \right]$ , которая следует из соотношения  $P = 1 - P_{\text{отк}}$ . Здесь  $P_{\text{отк}}$  - вероятность отказа.

Вид уравнения указывает на то, что задача свелась к решению трансцендентного уравнения. С помощью универсального программного средства символьной математики Derive 5 было

получено решение численным методом для службы движения аэропорта «Пулково» при фактической интенсивности обслуживания  $\mu = 4,7 \text{ 1/ч}$  (табл. 3). Таким способом находилось предельное  $n$  для заданных значений  $P, \lambda, \mu$ .

Предельное значение  $n$  определяет способность диспетчера к обслуживанию  $n$  ВС одновременно, тем самым предъявляет требования к квалификации диспетчера. Например, если в воздушной зоне планируется интенсивность ВД 10 ВС в час, то, для того чтобы ВС не было отказано в обслуживании в любой произвольный момент времени  $\tau$  с вероятностью 0,997, диспетчер должен уметь обслуживать одновременно  $> 7$  ВС.

**Таблица 3**

Характеристики потока для интенсивности обслуживания  $\mu = 4,7 \text{ 1/ч}$

$\lambda$	$\mu$	$\rho=\lambda/\mu$	$P$	$n$	$\lambda$	$\mu$	$\rho=\lambda/\mu$	$P$	$n$
10	4,7	2,13	0,5	2	1	4,7	0,21	0,5	0,52
			0,9	4,11				0,9	1,27
			0,95	4,92				0,95	1,58
			0,997	7,35				0,997	2,68
5	4,7	1,06	0,5	1,7	0,1	4,7	0,021	0,5	0,2
			0,9	2,76				0,9	0,62
			0,95	3,28				0,95	0,79
			0,997	5,15				0,997	1,44

В заключение отметим, что проведенные исследования с помощью модели функционирования системы УВД, разработанной в [4], позволяют оценить пропускную способность ДП и показывают её прямую зависимость от  $n$ , которая характеризует способность диспетчера одновременно обслуживать несколько ВС. Увеличение числа ВС, одновременно обслуживаемых диспетчером в условиях существующих технических систем УВД, скорей всего, затруднительно и малоэффективно.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Крыжановский Г.А., Алешин В.Н., Дарымов Ю.П. [и др.]. Организация управления воздушным движением / под ред. Г.А. Крыжановского. - М.: Транспорт, 1988.
2. Клейнер Л. Вычислительные системы с очередями / пер. с англ. / под ред. В.С. Цыбакова. - М.: Мир, 1979.
3. Вентцель Е.С. Теория вероятностей: учебник для вузов. – 6-е изд. стер. - М.: Высшая школа, 1999.
4. Шестаков И.Н. Технология повышения результативности функционирования системы организации воздушного движения // Приборы и системы. - 2009. - №3. - С.1-5.

#### CALCULATIONS OF PERFORMANCE PRODUCTIVITY OF ATC AS A QUEUING SYSTEM WITH FAILURES

Shestakov I.N., Shestakova M.I.

The article give reasons for possibility of the investigation of the ATC system as a queuing system with failures. The concept of the failure is explained through the extreme condition of an ATC Unit. Criteria of the system's performance productivity within the theory of queuing are given. The results of the calculations of the system's productivity are provided.

**Keywords:** queuing system, lateral navigation.

#### Сведения об авторах

**Шестаков Иван Николаевич**, 1963 г.р., окончил ОЛАГА (1991), доцент, кандидат технических наук, доцент кафедры электросветотехнического обеспечения полётов СПбГУГА, автор более 150 научных работ, область научных интересов - оценка квалификации авиационного персонала на основе рейтингов, использование спутниковых технологий в интересах ОВД, интегрирование бортовых и наземных аэронавигационных процедур.

**Шестакова Марианна Ивановна**, окончила СПбГУГА (2013), аспирантка СПбГУГА, автор 4 научных работ, область научных интересов - оптимизация работы логистических центров.