

УДК 681.5.015

# МЕТОД ОЦЕНКИ ПРОПУСКНОЙ СПОСОБНОСТИ АЭРОВОКЗАЛЬНОГО КОМПЛЕКСА С ПОМОЩЬЮ ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

**Н. Н. Майоров<sup>а</sup>**, канд. техн. наук, доцент

**В. А. Фетисов<sup>а</sup>**, доктор техн. наук, профессор

<sup>а</sup>Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, Санкт-Петербург, РФ

**Цель:** для качественной и бесперебойной работы аэропорта необходима слаженная работа множества подразделений и служб, которые в случае возникновения проблемных ситуаций должны быстро принимать меры по их ликвидации. Численность подразделений и служб может меняться в зависимости от суточной загруженности терминала. Целью работы является моделирование пассажирских потоков и работы служб аэропорта для формирования системы принятия решения о качественной работе аэропорта и количестве необходимого персонала для обслуживания пассажиров. **Результаты:** создана математическая имитационная модель пассажиропотоков с использованием агентного моделирования в среде AnyLogic. В модели представлена работа пассажирского терминала аэропорта и реализована работа всех подразделений терминала. **Практическая значимость:** разработанная имитационная модель обладает не только высокой точностью моделирования, но и позволяет всего за считанные минуты получать прогноз пассажиропотока на несколько часов вперед. Имитационная модель учитывает особенности всех важнейших элементов аэропорта, влияющих на пассажиропоток. При запуске модели около 200/300 раз в день генерируется большой объем данных, которые потом должны программно анализироваться, чтобы быть преобразованными для системы принятия решения по управлению службами аэропорта.

**Ключевые слова** — аэропорт, интенсивность, количество мест, моделирование, транспортировка, система массового обслуживания, агентное моделирование.

## Введение

Рост интенсивности полетов и сезонных пиковых нагрузок на аэропорт, необходимость эффективно управлять воздушным движением, жесткие требования к оптимизации структуры и функций подразделений аэропортского комплекса — это основные тенденции развития современных аэропортов [1–4]. Существующая инфраструктура по мере увеличения пассажиропотока может быть не в состоянии обеспечить качественное обслуживание пассажиров и соответствующую логистику в пиковые режимы и, как следствие, требует значительных инвестиций для реорганизации и реконструкции как самого аэропорта, так и прилегающих к нему территорий. Аэропорты в настоящее время становятся основой крупных мультимодальных узлов, части которых чрезвычайно сложны из-за огромного количества составляющих их элементов, многочисленных связей между ними, сложной организации. Задача исследования аэровокзального комплекса актуальна, так как сегодня при изучении аэропортов особую значимость приобретают вопросы: как будут работать все системы в комплексе в зависимости от изменения нагрузки; как изменится пассажиропоток, если одна из служб перейдет на новый режим работы либо будут внедрены новые; что произойдет, если в несколько раз увеличится пассажиропоток? Ответы можно получить только с помощью спе-

циализированных имитационных моделей, которые прогнозируют работу аэропорта и его служб. Так как каждый аэропорт обладает своими особенностями, то невозможно создать одну универсальную имитационную модель и использовать ее на других транспортных объектах.

Поскольку обслуживание пассажиров является основным бизнес-процессом в деятельности аэропорта, то в данной публикации построена именно его имитационная модель. Объектом исследования был выбран пассажирский терминал аэропорта.

## Особенности моделирования пассажиропотока аэровокзала

Аэровокзалы аэропортов предназначены для обслуживания улетающих и прилетающих пассажиров. Их основной технической характеристикой является пропускная способность. Любой сбой вызывает цепную реакцию в других службах, приводящую к задержанию рейсов. При возникновении частных сбоев проверка работы определенной службы производится с привлечением профессионального сотрудника, который замеряет время на обработку пассажира или багажа и после анализа данных предлагает причины сбоев. Такой путь не всегда применим, так как работу некоторых служб нельзя приостановить. Моделируя работу аэровокзала, можно предварительно спрогнозировать места в системе, которые

могут быть источниками задержек, и таким образом заранее избежать сбоев.

При исследовании пассажирских потоков на территории аэропорта особую значимость имеют архитектурные возможности зданий, которые используются в качестве основ инфраструктуры для имитационных моделей.

Ответить на вопросы, касающиеся оценки работы аэропорта, помогает применение инструментов и методов, учитывающих не только статические параметры работы аэропорта, но и динамические факторы, порождающие изменения этих параметров. Одним из таких инструментов является имитационное моделирование, на базе которого можно создать модели для оптимизации работы аэропортового комплекса.

С помощью имитационного моделирования [1–7] можно проводить эксперименты для оценки работы системы, меняя такие параметры, как расписание, график прибытия пассажиров, правила их обслуживания и маршруты перемещения по терминалу, количество оборудования в зонах регистрации, таможни и выдачи багажа, расположение магазинов, вводя случайное возникновение сбоев и т. д.

Вопросы, на которые может ответить имитационное моделирование применительно к аэровокзальному комплексу, разделим на три основные группы:

1) определение количественных показателей: численности персонала; площадей; числа оборудования, стоек, телетрапов, транспорта и т. п.;

2) оптимизация планировок: наилучшее взаимное размещение различных зон, ресурсов; топология конвейерных систем;

3) оптимизация логики функционирования и правил работы: возможность увеличения эффективности работы без дополнительных инвестиций в оборудование за счет оптимизации управления.

Имитационное моделирование должно применяться на всех этапах жизненного цикла аэропортового комплекса. На этапе стратегического планирования оно выступает как инструмент поддержки принятия решений о концепции и параметрах проектируемой системы, анализа производительности комплекса и эффективности инвестиций. При принятии тактических решений оно позволяет избежать ошибок или спрогнозировать необходимые мероприятия, например, при принятии решения о возможности обслуживания еще одной авиакомпании на имеющихся мощностях или при реализации изменений в правилах безопасности. Имитационная модель может быть использована и при оперативном планировании работы служб. В любой системе периодически возникают отклонения (например, задержка рейсов или выход из строя какого-либо

оборудования), поэтому необходимо оперативно принимать решения о перераспределении ресурсов, об изменении графика работы или порядка обслуживания.

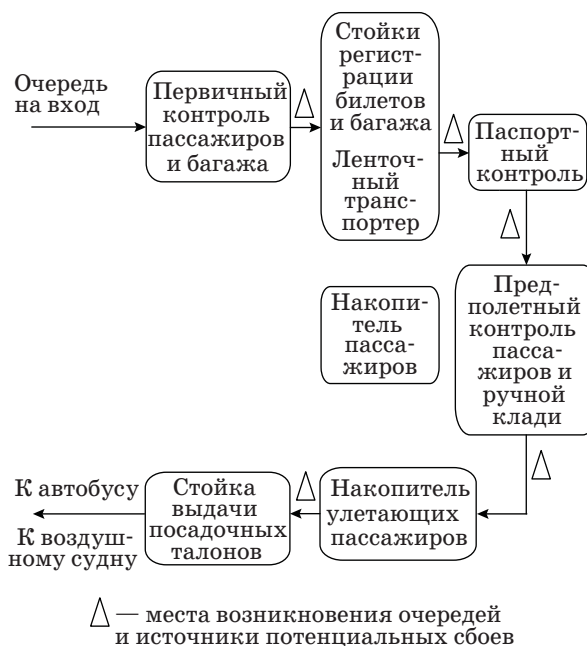
### Практическая реализация имитационного моделирования

Аэровокзал аэропорта является логистической [6] системой массового обслуживания пассажиров и их багажа. При увеличении интенсивности пассажиропотока необходимо увеличивать пропускную способность аэровокзала. Известно, что обслуживающая пассажиров система состоит из ряда последовательно установленных в технологическом процессе подсистем (рис. 1).

В каждой из этих подсистем пассажир затрачивает разное время на обслуживание. Данное нормировочное время необходимо закладывать как норматив в имитационную модель. При выходе за его пределы система должна информировать о наличии локального сбоя. Суммарное время обслуживания пассажиров [3] можно представить в развернутом виде в форме линейной суммы переменных:

$$T_{o.п} = \sum_i^N t_i,$$

где  $N$  — количество операций;  $i$  — технологические этапы обработки пассажира;  $t_1$  — проверка пассажира на входе в аэровокзал;  $t_2$  — проверка багажа пассажира при перемещении в аэро-



■ Рис. 1. Логистическая цепь движения улетающих пассажиров

вокзал;  $t_3$  — досмотр багажа пассажира на входе в операционный зал;  $t_4$  — прием и сверка на стойке регистрации паспорта пассажира и багажа;  $t_5$  — набор/считывание компьютером данных о билете пассажиров;  $t_6$  — отрыв контрольного талона для ручной клади и багажа;  $t_7$  — установка багажа на ленту транспортера;  $t_8$  — закрепление талона на ручке багажа;  $t_9$  — ожидание паспортного контроля;  $t_{10}$  — прохождение паспортного контроля;  $t_{11}$  — повторный досмотр пассажира и ручной клади;  $t_{12}$  — ожидание разрешения на посадку;  $t_{13}$  — получение посадочного талона;  $t_{14}$  — проход по телескопическому трапу или посадка в автобус, отправляющийся к самолету.

Учитывая тот факт, что пассажиру надо проходить много мест обслуживания, можно утверждать, что аэровокзал является многоканальной системой массового обслуживания. В этой системе пассажира следует рассматривать как заявку на обслуживание, а накопителями заявок будут залы ожидания, где должна соблюдаться дисциплина обслуживания, т. е. порядок обслуживания поступивших заявок. При создании имитационной модели необходимо закладывать возможность выбора различных законов распределения [5, 6]. На пропускную способность аэровокзала, как вероятностную систему, оказывает влияние интенсивность обслуживания каждого элемента системы (канала обслуживания), т. е. рабочего места сотрудника аэропорта.

Таким образом, пропускная способность аэровокзала зависит от интенсивности обслуживания пассажиров [6, 8]. Для повышения пропускной способности аэровокзалов аэропортов целесообразно повысить интенсивность обслуживания пассажиров. Наиболее проблемными участками, где чаще всего наблюдаются очереди, на основе рассмотренной логистической цепи, являются:

- 1) входной контроль потока пассажиров и багажа;
- 2) стойки регистрации пассажиров и багажа;
- 3) места предполетного досмотра пассажиров и ручной клади;
- 4) залы ожидания пассажиров;
- 5) стойки выдачи посадочных талонов;
- 6) стойки таможенного контроля;
- 7) зоны беспешинной торговли.

Одним из основных элементов взаимодействия пассажиров с работниками аэровокзала являются стойки регистрации, на которых осуществляется проверка билетов и паспортных данных, багажа и ручной клади. С другой стороны, пропускная способность аэровокзала зависит от движения воздушных судов, вместимости воздушного судна, занятости пассажирского перрона, метеоусловий и других факторов [9, 10]. Для реализации данного участка в имитационную модель вводится

расписание движения воздушных судов за заданный интервал времени.

Интенсивность заполнения пассажиропотоком воздушных судов можно представить в виде математической модели:

$$M[Q]_{\text{отпр}} = \sum_{i=1}^m \lambda_i M[Q_i] f_m,$$

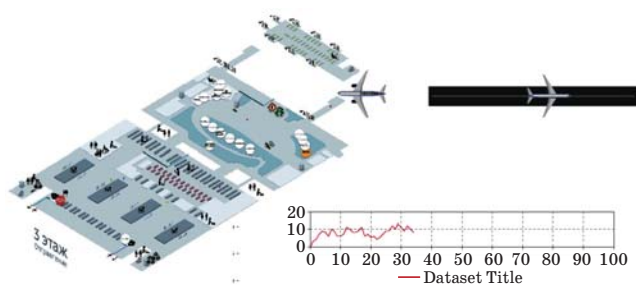
где  $m$  — число воздушных судов;  $\lambda_i$  — интенсивность движения пассажиров в воздушные суда;  $M[Q_i]$  — математическое ожидание количества пассажиров, заполняющих определенное воздушное судно;  $f_m$  — частота подхода воздушных судов к перронам.

Для оптимальной работы аэропорта необходимы оперативность и слаженность работы каждой службы, входящей в состав аэропорта, так как все службы взаимосвязаны между собой и составляют сложную техническую систему. Используя имитационное моделирование как метод оптимизации отдельных узлов аэропорта, мы можем получить степень нагрузки на тот или иной элемент и принимать решения по управлению или модернизации работы отдельного элемента, оценивая и улучшая при этом пропускную способность всего аэропорта.

За основной механизм моделирования было выбрано агентное моделирование. Практической реализацией имитационной модели выбрана среда AnyLogic [7]. Агентное моделирование как раз является инструментом, при помощи которого возможно успешное моделирование сложных адаптивных систем, к которым относится аэропорт. Агентное моделирование позволяет моделировать не агрегированные элементы системы, как это делает, например, системная динамика [7] при помощи системы потоков и накопителей, а напротив, базируется на идее моделирования процессов «снизу-вверх»: в основе модели лежит набор основных элементов, из взаимодействия которых рождается обобщенное поведение системы.

«Возникающее» поведение системы (в нашем случае — аэропорта) представляет собой результат взаимодействия элементов системы. Соответственно, в рамках данного подхода к моделированию возникает необходимость корректно отобразить механизм поведения и взаимодействия элементов системы — «агентов». Агентами в нашем случае являются пассажиры, проходящие на посадку воздушного судна.

В рамках данного исследования была поставлена задача оценки влияния работы отдельных узлов сложной технической системы на пропускную способность аэропорта системы в целом. За основу была взята схема одного этажа нового терминала аэропорта.



■ Рис. 2. Модуль имитационной модели по получению статистики по количеству обслуженных судов и интенсивности пассажирских потоков внутри терминала

Оконная форма одного модуля имитационной модели перемещения пассажиров внутри терминала с учетом размещения служб аэропорта отображена на рис. 2.

В результате работы данной имитационной модели мы получаем такие параметры, как статистика обслуженных судов, интенсивность движения, загруженность как отдельных подразделений, так и всего аэропорта системы и ряд других, необходимых для оптимизации работы.

### Заключение

Использование представленных математических моделей и метода агентного моделирования позволило реализовать точную имитационную модель работы аэропорта. В настоящее время разработанную имитационную модель надо применять для оптимизации пассажиропотоков, прогнозирования работы терминала на заданный интервал времени. Разработанная мо-

дель отличается многими достоинствами, среди которых:

- 1) простота использования благодаря агентному моделированию;
- 2) средства визуализации, позволяющие наглядно представить протекающие в терминале пассажирские процессы;
- 3) возможность поддержки иерархической структуры моделей — от единичной операции до аэропортового комплекса в целом;
- 4) возможность внесения в модель учета случайных факторов (отказов оборудования, времени обслуживания, отклонений в расписании и т. п.);
- 5) средства анализа интенсивности пассажиропотока, позволяющие быстро идентифицировать в системе проблемное место и принять меры к его устранению;
- 6) универсальные инструменты для оптимизации параметров и графиков работы.

Основной целью разработанной имитационной модели является достижение не только высокой точности моделирования, но и наивысшей производительности системы, которая позволяет всего за считанные минуты получить прогноз пассажиропотока на несколько часов вперед. Кроме того, имитационная модель учитывает особенности всех важнейших элементов аэропорта, влияющих на пассажиропоток. В настоящее время подобные имитационные модели должны разрабатываться и внедряться для оптимизации пассажиропотоков. На практике симуляция запускается около 200/300 раз в день, при этом генерируется большой объем данных, которые потом необходимо программно анализировать, чтобы перейти на систему принятия решения по управлению службами аэропорта.

### Литература

1. Фетисов В. А., Майоров Н. Н. Практические задачи моделирования транспортных систем: учеб. пособие. — СПб.: ГУАП, 2012. — 185 с.
2. Фетисов В. А., Майоров Н. Н., Таратун В. Е. Имитационное моделирование как метод оптимизации сложной технической системы // Системный анализ и логистика. 2013. Вып. 10. С. 63–69.
3. Русинов И. Я. Организация воздушных перевозок. — М.: Транспорт, 1976. — 184 с.
4. Афанасьев В. Г. Коммерческая эксплуатация международных воздушных линий. — М.: Транспорт, 2002. — 325 с.
5. Игнатьева А. В., Максимцов М. М. Исследование систем управления. — М.: ЮНИТИ-ДАНА, 2003. — 157 с.
6. Майоров Н. Н., Фетисов В. А., Гардюк А. Н. Технологии и методы моделирования пассажирских перевозок на воздушном транспорте. — СПб.: ГУАП, 2014. — 215 с.
7. Фетисов В. А., Майоров Н. Н. Моделирование транспортных процессов. — СПб.: ГУАП, 2011. — 165 с.
8. Правдин Н. В., Негрей В. Я., Подкопаев В. А. Взаимодействие различных видов транспорта (примеры и расчеты). — М.: Транспорт, 1989. — 208 с.
9. Чебраков Ю. В. Методы системного анализа в экспериментальных исследованиях. — СПб.: Изд-во Политехнического ун-та, 1997. — 304 с.
10. Бельский А. С. Исследование операций в транспортных системах: идеи и схемы методов оптимизации планирования. — М.: Мир, 1992. — 584 с.

UDC 681.5.015

### Airport Capacity Simulation Assessment

Maiorov N. N.<sup>a</sup>, PhD, Tech., Lecturer, sciencesuai@yandex.ru

Fetisov V. A.<sup>a</sup>, Dr. Sc., Tech., Professor, fet1@aanet.ru

<sup>a</sup>Saint-Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, 67, B. Morskaia St., 190000, Saint-Petersburg, Russian Federation

**Purpose:** A modern airport supposes well-coordinated functioning of many units and subdivisions which should promptly react to any contingency. Their number can vary depending on the daily workload of the terminal. The aim of this research is to simulate passenger traffic and airport service functioning to form a decision-making system which would analyze the quality of the airport functioning and the amount of necessary staff. **Results:** A mathematical simulation model of passenger traffic has been developed, using agent-based simulation in AnyLogic environment. The model represents the functioning of a passenger terminal, and simulates the activity of all units and subdivisions of the terminal. **Practical relevance:** The developed simulation model has high precision and good speed. In just a few minutes, you can get a passenger traffic forecast for several hours. The model takes into account the features of all the main elements of the airport affecting the passenger traffic. When the model is run, a huge amount of data is generated 200–300 times a day, to be programmatically analyzed later and converted for the airport management decision-making system.

**Keywords** — Airport, Intensity, Capacity, Simulation, Transportation, Queuing System, Agent-Based Simulation.

### References

1. Fetisov V. A., Maiorov N. N. *Prakticheskie zadachi modelirovaniia transportnykh sistem* [Practical Problems of Modeling of Transport Systems]. Saint-Petersburg, GUAP Publ., 2012. 185 p. (In Russian).
2. Fetisov V. A., Maiorov N. N., Taratun V. E. Simulation Modeling as a Method for Optimizing Complex Technical Systems. *Sistemnyi analiz i logistika*, 2013, vol. 10, pp. 63–69 (In Russian).
3. Rusinov I. Ia. *Organizatsiia vozdushnykh perevozok* [Organization of Air Traffic]. Moscow, Transport Publ., 1976. 184 p. (In Russian).
4. Afanas'ev V. G. *Kommercheskaia ekspluatatsiia mezhduarodnykh vozdushnykh linii* [Commercial Operation of International Air Services]. Moscow, Transport Publ., 2002. 325 p. (In Russian).
5. Ignat'eva A. V., Maksimtsov M. M. *Issledovanie sistem upravleniia* [Research of Management Systems]. Moscow, IuNITI-DANA Publ., 2003. 157 p. (In Russian).
6. Maiorov N. N., Fetisov V. A., Gardiuk A. N. *Tekhnologii i metody modelirovaniia passazhirskikh perevozok na vozdu-*
7. Maiorov N. N., Fetisov V. A. *Modelirovanie transportnykh protsessov* [Modeling of Transport Processes]. GUAP Publ., 2011. 165 p. (In Russian).
8. Pravdin N. V., Negrei V. Ia., Podkopaev V. A. *Vzaimodeistvie razlichnykh vidov transporta (primery i raschety)* [The Interaction of Different Modes of Transport (Examples and Calculations)]. Moscow, Transport Publ., 1989. 208 p. (In Russian).
9. Chebrakov Iu. V. *Metody sistemnogo analiza v eksperimental'nykh issledovaniiah* [System Analysis Methods in Experimental Studies]. Saint-Petersburg, Politekhnikeskii universitet Publ., 1997. 304 p. (In Russian).
10. Belen'kii A. S. *Issledovanie operatsii v transportnykh sistemakh: idei i skhemy metodov optimizatsii planirovaniia* [Operations Research in Transport Systems: the Ideas and Methods of Optimization of Planning Schemes]. Moscow, Mir Publ., 1992. 584 p. (In Russian).