

ИМИТАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ С НЕЧЁТКИМ РЕГУЛЯТОРОМ КАК ИНСТРУМЕНТ ОПТИМИЗАЦИИ НЕПОЛНОДОСТУПНОЙ СИСТЕМЫ НАЗЕМНОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ В УЗЛОВОМ АЭРОПОРТУ

© 2019

В. А. Романенко кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры организации и управления перевозками на транспорте; Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королёва; vla_rom@mail.ru

Рассмотрена актуальная для узловых аэропортов задача оптимизации численности технологических ресурсов функциональной подсистемы аэропорта, осуществляющей наземное обслуживание перевозок в рамках отдельной технологической операции. Анализ ограничен неполнодоступными системами, в которых обслуживание определённых заявок может быть выполнено только определёнными технологическими ресурсами, под которыми понимаются средства механизации и автоматизации, производственное оборудование, персонал и т.д. Оптимизационная задача сформулирована в вероятностной постановке. Описан подход к её решению. В качестве инструмента оптимизации предложено использовать имитационную компьютерную модель, учитывающую особенности потоков пассажиров и производственного процесса узлового аэропорта и включающую нечёткий регулятор, который отражает логику диспетчера аэропорта, управляющего процессом наземного обслуживания. Приведён модельный пример решения оптимизационной задачи, свидетельствующий о возможности и целесообразности использования нечёткого регулятора в качестве модели стратегии человека-оператора. Составляющая основной результат оптимизации временная зависимость численности технологических ресурсов функциональной подсистемы применима на этапах принятия решения о повышении её пропускной способности, оперативного управления ресурсами, планирования сменной работы персонала, решения ряда других задач, особенно актуальных для узловых аэропортов с их интенсивными, но неравномерными потоками самолётов и пассажиров.

Узловой аэропорт; неполнодоступная система; нечёткое управление; нечёткий регулятор; оптимизация; имитационная модель.

Цитирование: Романенко В.А. Имитационная модель с нечётким регулятором как инструмент оптимизации неполнодоступной системы наземного обслуживания в узловом аэропорту // Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. 2019. Т. 18, № 4. С. 183-191. DOI: 10.18287/2541-7533-2019-18-4-183-191

Введение

В роли объекта исследования выступает компонент системы наземного обслуживания перевозок узлового аэропорта – его производственное подразделение, предназначенное для выполнения определённой технологической операции и оснащённое с этой целью соответствующими технологическими ресурсами. Проблемой, особенно актуальной для узловых аэропортов с их интенсивными и испытывающими резкие колебания потоками самолётов и пассажиров и жёсткими требованиями к уровню их наземного обслуживания, является определение оптимальной по критерию экономичности численности ресурсов отдельных подсистем. Это знание даёт возможность своевременно принять решение о целесообразности повышения пропускных способностей. Наряду с определением величины максимальной численности ресурсов, необходимой в моменты пиковой загрузки подсистемы, имеется необходимость в построении временной зависимости потребной численности ресурсов на больших промежутках времени. Её использование позволяет аэропорту повысить эффективность.

Рассматриваемые подсистемы служат примерами системы управления (СУ), в которой в роли объекта управления выступает группа однотипных технологических ресурсов, а функции управляющего устройства (УУ) осуществляет человек-оператор (диспетчер аэропорта). Круг исследуемых подсистем ограничен неподступными обслуживающими системами, такими как, например, подсистема предполётной регистрации пассажиров по порейсовой схеме с выделением для обслуживания пассажиров определённого рейса одной или нескольких определённых стоек регистрации. Особенности аэропортов рассматриваемой категории [1-3] делают имитационную компьютерную модель наиболее предпочтительным инструментом решения обозначенной выше оптимизационной задачи.

Имитационная модель рассматриваемой СУ включает модель УУ, воспроизводящую действия человека. Для формализации используемых оператором эвристических правил управления используются методы нечёткой логики. В рассматриваемой модели нечёткий логический регулятор (НР) является моделью стратегии оператора и, таким образом, служит моделью УУ. В настоящее время имеются многочисленные публикации, связанные с нечётким управлением самыми разнообразными объектами. Обзор работ можно найти, например, в [4; 5]. Однако практически отсутствуют работы, где рассматривались бы вопросы нечёткого управления системами и процессами аэропортового наземного обслуживания. В работе автора [6] была рассмотрена тема, развиваемая в данной статье.

Модель подсистемы наземного обслуживания перевозок

Имитационная модель подсистемы порейсовой регистрации первоначальных пассажиров формируется с использованием ряда не противоречащих практике допущений. Благодаря известной цикличности расписания узловых аэропортов [7], позволяющей описывать потоки самолётов периодическими функциями времени с величиной периода T , равной одним суткам, имитационный эксперимент сводится к единственной реализации («прогону») модели, охватывающей ряд модельных суток. Поток вылетающих самолётов принят пуассоновским с интенсивностью $\lambda^A(t)$, $t \in [0, T)$, изменяющейся по времени в течение модельных суток так, как это показано на рис. 1. Рисунок построен по результатам обработки расписания одного из европейских региональных узловых аэропортов.

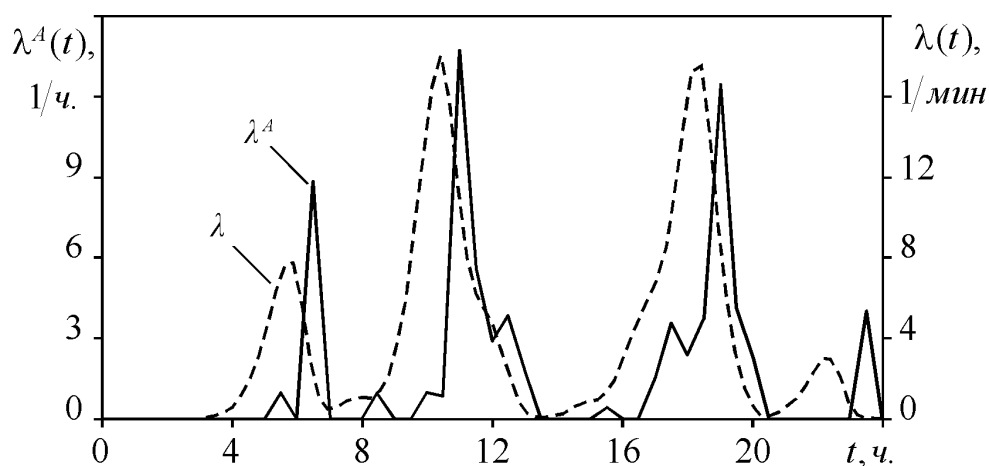


Рис. 1. Интенсивности потоков вылетающих самолётов и прибывающих в аэровокзал первоначальных пассажиров

Всё разнообразие типов самолётов, пассажиры которых поступают в подсистему на обслуживание, сводится к трём категориям. Численности первоначальных пассажиров самолёта приняты дискретными случайными величинами, равномерно распределёнными в следующих пределах, зависящих от категории самолёта: I категория – $5 \div 45$ пассажиров, II категория – $35 \div 110$ пассажиров, III категория – $90 \div 190$ пассажиров. Доли самолётов I и III категорий, составляющие в течение большей части модельных суток 20% в общем потоке вылетающих самолётов, не остаются неизменными. Согласно существующей практике доля малых самолётов повышается на начальном этапе «волн» массовых вылетов (на рис. 1 – промежутки 10:30-13:30 и 17:30-20:00). На конечном этапе «волн» преобладают самолёты более высоких категорий.

Модельный поток пассажиров, поступающих на регистрацию, формируется на базе модельного потока отправляемых самолётов. Используется случайная величина промежутка времени τ (мин) между моментами прибытия пассажира в аэровокзал для прохождения предполётных формальностей и вылета рассматриваемого рейса по расписанию с плотностью вероятности $f(\tau)$, определяемой трёхпараметрическим законом гамма-распределения [1]:

$$f(\tau) = \frac{1}{\Gamma(\alpha)} (\tau - c)^{\alpha-1} \beta^{-\alpha} e^{-(\tau-c)/\beta}, \quad \tau > 0, \quad (1)$$

где α, β, c – параметры распределения; $\alpha = 6,1$; $\beta = 12,6$; $c = 20,0$ мин.

Учитывается групповой характер потока пассажиров. Под группой понимаются пассажиры, совместно предъявляющие билеты для регистрации и имеющие общий багаж. Случайное число пассажиров в группе моделируется с использованием распределения Пуассона. Средняя численность группы принята равной 1,35 пассажира. Полученная с учётом допущений временная зависимость суммарной интенсивности $\lambda(t)$ потоков пассажиров всех рейсов на регистрацию для модельных суток приведена на рис. 1.

Продолжительность регистрации группы пассажиров (мин) принята случайной величиной, распределённой по гамма-закону (1). Анализ статистики, полученной в ряде аэропортов, позволил считать распределение времени регистрации группы зависящим только от её численности N_{gp} . Параметр α распределения (1) принимается постоянным, а два других параметра – линейно зависящими от N_{gp} :

$$\alpha = 2,5; \quad \beta = 0,13N_{gp} + 0,15; \quad c = 0,17N_{gp}.$$

Плановая (согласно технологическому графику наземного обслуживания) продолжительность регистрации всех пассажиров одного самолёта зависит от его категории и принимается равной 90, 115 и 130 мин для самолётов I, II и III категории соответственно. Плановый промежуток времени от момента окончания регистрации до вылета по расписанию предполагается одинаковым для самолётов всех категорий, равным 40 мин. Обслуживание опоздавших пассажиров, прибывших в зону регистрации после наступления планового момента её окончания, не учитывается.

Нечёткое управление в модели подсистемы наземного обслуживания перевозок

Для моделирования логики управления процессом регистрации первоначальных пассажиров вводится ряд допущений. Предполагается, что задача оператора состоит в определении числа Z_i рабочих мест, выделяемых для регистрации пассажиров, выле-

тающих очередным (i -м) самолётом. Практика показывает, что наиболее весомыми факторами, влияющими на решение оператора, принимаемое в момент планового начала регистрации, следует считать: 1) число N_i первоначальных пассажиров i -го самолёта; 2) число L_i мест багажа первоначальных пассажиров i -го самолёта, оформляемых к перевозке под ответственность перевозчика; 3) общее число Z_i^Σ мест регистрации, занятых обслуживанием пассажиров к моменту принятия решения. Для оператора источником значений N_i , Z_i^Σ , L_i является система управления отправлениями и непосредственные наблюдения за потоком пассажиров.

Помимо перечисленных оператор принимает во внимание ряд второстепенных факторов, с трудом поддающихся формализации, наличие которых делает факт выбора некоторого решения случайным. Для учёта стохастичности выбора вводятся вероятности выделения одного, двух и трёх мест для регистрации пассажиров i -го самолёта – p_{1i} , p_{2i} и p_{3i} соответственно, используемые имитационным алгоритмом для «розыгрыша» случайного числа мест Z_i .

Функции НР сводятся к определению вероятностей p_{1i} , p_{2i} , p_{3i} по заданным величинам N_i , L_i и Z_i^Σ . В модели НР реализован по типовой схеме [8] и включает следующие элементы: заданные функции принадлежности входных и выходных переменных; нечёткую базу правил, устанавливающих взаимосвязь между входами и выходами; механизм нечёткого логического вывода; метод приведения к чёткости выходных переменных (дефаззификации).

Будем различать измеряемые входные переменные N_i , L_i и Z_i^Σ , принимающие значения из множества целых неотрицательных чисел, и соответствующие им лингвистические переменные N_i^* , L_i^* и $Z_i^{\Sigma*}$, принимающие нечёткие значения из термножеств $\{\tilde{N}_i^B, \tilde{N}_i^M, \tilde{N}_i^L\}$, $\{\tilde{L}_i^B, \tilde{L}_i^L\}$, $\{\tilde{Z}_i^{\Sigma B}, \tilde{Z}_i^{\Sigma M}, \tilde{Z}_i^{\Sigma L}\}$ соответственно. Для обозначения термов лингвистических переменных используем индексы, имеющие следующий смысл: B – «большое число», M – «среднее число», L – «малое число». Аналогично, выходным переменным p_{1i} , p_{2i} , p_{3i} , принимающим числовые значения на промежутке $[0,1]$, поставим в соответствие выходные лингвистические переменные p_{1i}^* , p_{2i}^* , p_{3i}^* со значениями из термножеств $\{\tilde{p}_{1i}^B, \tilde{p}_{1i}^M, \tilde{p}_{1i}^L\}$, $\{\tilde{p}_{2i}^B, \tilde{p}_{2i}^M, \tilde{p}_{2i}^L\}$, $\{\tilde{p}_{3i}^B, \tilde{p}_{3i}^M, \tilde{p}_{3i}^L\}$. Графики функций принадлежности термов входных лингвистических переменных, полученные с использованием результатов обработки статистических данных производственной информационной системы одного из крупных региональных аэропортов и опроса специалистов соответствующих его служб, приведены на рис. 2.

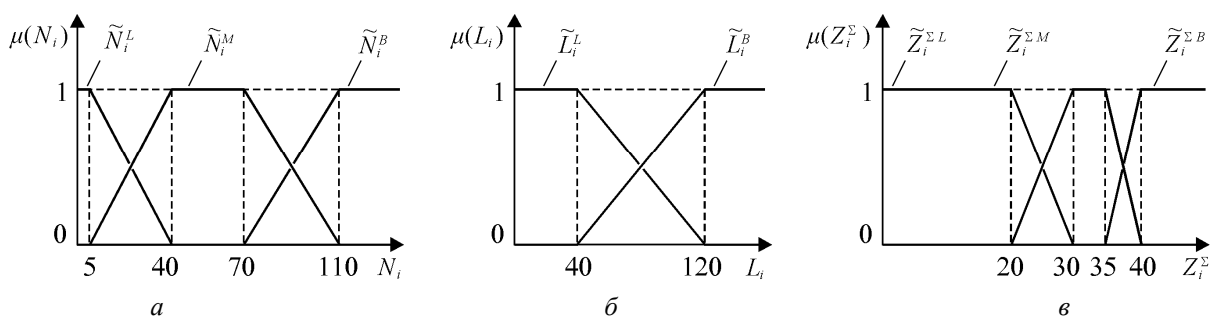


Рис. 2. Функции принадлежности термов входных лингвистических переменных:

$a - N_i^*$; $б - L_i^*$; $в - Z_i^{\Sigma*}$

Нечёткая база правил для входных лингвистических переменных N_i^* , L_i^* , $Z_i^{\Sigma^*}$ и выходных – p_{1i}^* , p_{2i}^* , p_{3i}^* представлена в форме табл. 1, где столбцы соответствуют отдельным нечётким логическим правилам.

Таблица 1. Нечёткая база правил управления подсистемой наземного обслуживания перевозок

N_i^*	B	B	B	B	B	B	M	M	M	M	M	M	L	L	L	L	L	L
L_i^*	B	B	B	L	L	L	B	B	B	L	L	L	B	B	B	L	L	L
$Z_i^{\Sigma^*}$	L	M	B	L	M	B	L	M	B	L	M	B	L	M	B	L	M	B
p_{1i}^*	L	M	M	L	M	M	L	L	M	M	M	B	B	B	B	B	B	B
p_{2i}^*	M	B	B	B	B	B	M	M	B	B	B	M	M	M	L	L	L	L
p_{3i}^*	B	B	M	M	M	L	B	M	L	M	L	L	L	L	L	L	L	L

Небольшое число термов лингвистических переменных позволяет обойтись базой правил небольшого объёма. С целью дальнейшего упрощения процедуры нечёткого управления будем считать термы выходных лингвистических переменных синглтонными (одноточечными) нечёткими множествами, присвоив им значения:

$$\tilde{p}_{1i}^L = \tilde{p}_{2i}^L = \tilde{p}_{3i}^L = p_i^L = 0; \quad \tilde{p}_{1i}^M = \tilde{p}_{2i}^M = \tilde{p}_{3i}^M = p_i^M = 0,5; \quad \tilde{p}_{1i}^B = \tilde{p}_{2i}^B = \tilde{p}_{3i}^B = p_i^B = 1.$$

Раздельно для каждой из трёх выходных переменных реализуется алгоритм нечёткого вывода по синглтонной базе правил [9], который может рассматриваться как частный случай алгоритма Мамдани [10]. Результатами являются нечёткие вероятности \tilde{p}_{1i} , \tilde{p}_{2i} , \tilde{p}_{3i} , имеющие, благодаря синглтонному характеру термов выходных лингвистических переменных, дискретные функции принадлежности. Дефаззификация величин \tilde{p}_{1i} , \tilde{p}_{2i} , \tilde{p}_{3i} , выполняемая методом центраида [8], обеспечивает получение искоемых вероятностей p_{1i} , p_{2i} и p_{3i} .

Постановка оптимизационной задачи и подход к её решению

На временном интервале $[0, T)$ требуется определить зависимость от времени оптимального числа $z_{opt}(t)$ однотипных ресурсов в описанной выше недоступной системе обслуживания при использовании рассмотренного нечёткого управления. Под оптимальным понимается минимальное число мест регистрации, достаточное для обеспечения аэропортом своевременного начала выполнения данной операции с заданной надёжностью P при условии, что регистрация пассажиров на i -й самолёт начинается только при наличии определённых диспетчером Z_i свободных мест.

Для решения оптимизационной задачи используется следующий подход, позволяющий приближённо определить $z_{opt}(t)$ по результатам единственного «прогона» имитационной модели, продолжительность которого задаётся исходя из необходимой точности. Предполагается, что модельная численность z_{max} ресурсов аэропорта настолько велика, что заведомо превосходит значение искомой оптимальной численности $z_{opt}(t)$ для любого момента $t \in [0, T)$ модельных суток. Из-за стохастичности процессов оптимизируемой подсистемы общая численность $Z(t)$ мест регистрации, занятых обслуживанием пассажиров в момент $t \in [0, T)$, представляет собой случайный процесс с функцией распределения $F_Z(z, t) = P\{Z(t) \leq z\}$, $0 \leq z \leq z_{max}$, определяемой с

помощью имитационного моделирования. По результатам прогона имитационной модели искомая оптимальная численность $z_{opt}(t)$, необходимая для обслуживания пассажиров всех самолётов в момент $t \in [0, T)$, определяется как минимальная из величин $0 \leq z \leq z_{max}$, обеспечивающих выполнение условия $P\{Z(t) \leq z\} \geq P$.

Результаты модельного примера решения оптимизационной задачи

Сформулированная оптимизационная задача решена с использованием имитационной модели, программно реализованной на базе системы имитационного моделирования AnyLogic 6 University. Для приведённых выше исходных данных при использовании персональной вычислительной техники затраты машинного времени на решение с погрешностью получаемых результатов в пределах 1% не превысили 15 мин.

Часть результатов оптимизации представлена на рис. 3. Главным итогом явилось получение временной зависимости оптимального числа ресурсов $z_{opt}(t)$ на уровне надёжности $P=0,95$. Как следует из рис. 3, а, максимальное за сутки число ресурсов составило 57 единиц, однако близкая к этому уровню численность требуется в течение всего около 2 ч. Неравномерность потоков, присущая узловому аэропорту, приводит к тому, что гораздо более скромное число мест, не превышающее 25-27 единиц, является достаточным в течение 20 ч. Приведённая на рис. 3, а временная зависимость среднего числа $\bar{Z}(t)$ мест регистрации, занятых обслуживанием, даёт возможность представить степень разброса случайного процесса $Z(t)$.

Оценить уровень качества обслуживания пассажиров позволяет отображённый на рис. 3, б график среднего времени $\bar{T}_w(t)$ ожидания в очереди на регистрацию пассажиров, прибывших в аэровокзал в момент $t \in [0, T)$. В течение продолжительных промежутков времени эта величина остаётся на довольно высоком уровне, достигая 7,5 мин. Такие значения говорят о невысоком комфорте пребывания пассажиров в рассматриваемом аэропорту и служат основанием для пересмотра подхода к управлению процессом регистрации или для более радикального шага, состоящего в переходе аэропорта к более производительным схемам регистрации пассажиров.

Результаты включают также временную зависимость $N_w^{0,99}(t)$, $t \in [0, T)$, 0,99-квантиля числа пассажиров в очереди и на обслуживании в зоне регистрации, позволяющую оценить потребную вместимость зоны регистрации. Согласно данным на рис. 3, б необходимая с надёжностью 0,99 вместимость зоны регистрации аэропорта составляет около 400 пассажиров.

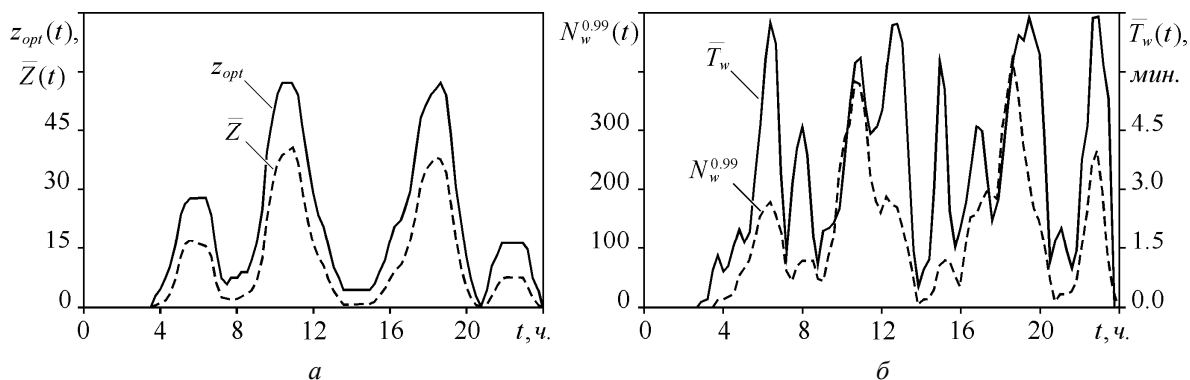


Рис. 3. Временные зависимости, полученные в результате оптимизации:
а – численность мест регистрации; б – характеристики очереди пассажиров на регистрацию

Заключение

Имитационное моделирование позволяет сформировать детальный стохастический портрет функциональных подсистем аэропортов, в том числе относящихся к такой перспективной категории, как узловые аэропорты. Использование нечёткого логического регулятора для моделирования поведения диспетчера, управляющего аэропортовыми процессами, даёт возможность повысить точность имитационных моделей. Оптимизация параметров функциональных подсистем может позволить службам аэропорта обеспечить рациональное решение таких задач, как оперативное маневрирование ресурсами, перераспределение сил и средств между подсистемами, планирование сменной работы персонала, расчёт необходимой численности смен и других задач, особенно актуальных для узловых аэропортов.

Библиографический список

1. Романенко В.А. Моделирование производственных процессов узловых аэропортов. Saarbrücken: LAP Lambert Academic Publishing, 2012. 296 с.
2. Романенко В.А. Оптимизация параметров системы трансферных авиаперевозок с учётом нечёткой и стохастической неопределённостей // Управление большими системами. 2013. № 41. С. 285-313.
3. Guzha E.D., Romanenko V.A., Skorokhod M.A. Optimization model of the hub airport schedule under uncertainty // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2018. V. 450. DOI: 10.1088/1757-899X/450/2/022023
4. Каспрзык J., Pedrycz W. Springer handbook of computational intelligence. Heidelberg: Springer-Verlag, 2015. 1633 p. DOI: 10.1007/978-3-662-43505-2
5. Ross T.J. Fuzzy logic with engineering applications. United Kingdom: John Wiley & Sons Inc., 2010. 585 p.
6. Васильева И.А., Романенко В.А., Хвостова Т.В. Оптимизация параметров системы наземного обслуживания воздушных судов узлового аэропорта на базе имитационной модели с нечётким регулятором // Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. 2017. Т. 16, № 1. С. 7-19. DOI: 10.18287/2541-7533-2017-16-1-7-19
7. Burghouwt G., De Wit J. Temporal configurations of European airline networks // Journal of Air Transport Management. 2005. V. 11, Iss. 3. P. 185-198. DOI: 10.1016/j.jairtraman.2004.08.003
8. Пегат А. Нечёткое моделирование и управление. М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2013. 798 с.
9. Mendel J.M. Uncertain rule-based fuzzy logic systems: introduction and new directions. Switzerland: Springer International Publishing, 2017. 696 p. DOI: 10.1007/978-3-319-51370-6
10. Mamdani E.H. Applications of fuzzy algorithms for control of simple dynamic plant // Proceedings of the Institution of Electrical Engineers. 1974. V. 121, Iss. 12. P. 1585-1588. DOI: 10.1049/piee.1974.0328

FUZZY-CONTROLLER SIMULATION MODEL AS A TOOL OF OPTIMIZATION OF A LIMITED AVAILABILITY GROUND HANDLING SYSTEM AT A HUB AIRPORT

© 2019

V. A. Romanenko Candidate of Science (Engineering), Associate Professor, Associate Professor of the Department of Transportation Management and Control; Samara National Research University, Samara, Russian Federation; vla_rom@mail.ru

The task of optimizing the optimal quantity of technological resources of a hub airport's functional subsystem, executing an individual process step of ground handling, is considered. This problem is relevant to hub airports. The analysis is limited to limited availability systems in which handling of certain orders can be performed only by certain resources which are used in reference to automated and mechanical equipment, industrial equipment, personnel, etc. The optimization problem is formulated in a probabilistic statement. An approach to solving the problem is described. We suggest using a simulation computer model as an optimization tool. The model takes into account the features of passenger flows and the operating process of a hub airport and includes a fuzzy controller that reflects the logic of the airport operator who controls the ground handling process. The paper describes a model example of solving an optimization problem indicating the possibility and expedience of using a fuzzy controller as a model for the strategy of a human operator. Time dependence of the quantity of technological resources of the functional subsystem is the main result of optimization. This dependence is applicable at the stages of making decisions concerning increase of its capacity rate, operative resource management, planning staff shift work, solving a number of other tasks, especially relevant for hub airports with intense but non-uniform flows of aircraft and passengers.

Hub airport; limited availability system; fuzzy control; fuzzy controller; optimization; simulation model.

Citation: Romanenko V.A. Fuzzy-controller simulation model as a tool of optimization of a limited availability ground handling system at a hub airport. *Vestnik of Samara University. Aerospace and Mechanical Engineering*. 2019. V. 18, no. 4. P. 183-191. DOI: 10.18287/2541-7533-2019-18-4-183-191

References

1. Romanenko V.A. *Modelirovanie proizvodstvennykh protsessov uzlovykh aeroportov* [Hub process simulation]. Saarbrücken: LAP Lambert Academic Publishing, 2012. 296 p.
2. Romanenko V.A. Optimization of transfer air transportation system parameters considering fuzzy and stochastic uncertainties. *Automation and Remote Control*. 2015. V. 76, Iss. 8. P. 1500-1514. DOI: 10.1134/S0005117915080135
3. Guzha E.D., Romanenko V.A., Skorokhod M.A. Optimization model of the hub airport schedule under uncertainty. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2018. V. 450. DOI: 10.1088/1757-899X/450/2/022023
4. Kacprzyk J., Pedrycz W. Springer handbook of computational intelligence. Heidelberg: Springer-Verlag, 2015. 1633 p. DOI: 10.1007/978-3-662-43505-2
5. Ross T.J. Fuzzy logic with engineering applications. United Kingdom: John Wiley & Sons Inc., 2010. 585 p.
6. Vasileva I.A., Romanenko V.A., Khvostova T.V. Optimization of parameters of a hub aircraft ground handling system on the basis of a fuzzy-controller simulation model. *Vestnik of Samara University. Aerospace and Mechanical Engineering*. 2017. V. 16, no. 1. P. 7-19. DOI: 10.18287/2541-7533-2017-16-1-7-19 (In Russ.)
7. Burghouwt G., de Wit J. Temporal configurations of European airline networks. *Journal of Air Transport Management*. 2005. V. 11, Iss. 3. P. 185-198. DOI: 10.1016/j.jairtraman.2004.08.003
8. Piegat A. Fuzzy modeling and control. Heidelberg: Physica-Verlag, 2001. 728 p.

9. Mendel J.M. Uncertain rule-based fuzzy logic systems: introduction and new directions. Switzerland: Springer International Publishing, 2017. 696 p. DOI: 10.1007/978-3-319-51370-6

10. Mamdani E.H. Applications of fuzzy algorithms for control of simple dynamic plant. *Proceedings of the Institution of Electrical Engineers*. 1974. V. 121, Iss. 12. P. 1585-1588. DOI: 10.1049/piee.1974.0328