

ОПТИМИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ СИСТЕМЫ НАЗЕМНОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ ВОЗДУШНЫХ СУДОВ УЗЛОВОГО АЭРОПОРТА НА БАЗЕ ИМИТАЦИОННОЙ МОДЕЛИ С НЕЧЁТКИМ РЕГУЛЯТОРОМ

© 2017

- И. А. Васильева** аспирант кафедры эксплуатации авиационной техники;
Самарский национальный исследовательский университет
имени академика С.П. Королёва;
irina.vasileva.14@mail.ru
- В. А. Романенко** кандидат технических наук, доцент кафедры организации и управления
перевозками на транспорте;
Самарский национальный исследовательский университет
имени академика С.П. Королёва;
vla_rom@mail.ru
- Т. В. Хвостова** аспирант кафедры организации и управления перевозками на транспорте;
Самарский национальный исследовательский университет
имени академика С.П. Королёва;
sorokina1605@gmail.com

Рассмотрена проблема определения оптимального количества технологических ресурсов функциональной подсистемы узлового аэропорта, осуществляющей наземное обслуживание воздушных судов (ВС) в рамках выбранной технологической операции. В качестве инструмента оптимизации предложено использовать имитационную модель, учитывающую особенности производственного процесса узлового аэропорта и включающую нечёткий регулятор (НР), 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.

Узловой аэропорт; наземное обслуживание; технологические ресурсы; оптимизация; имитационная модель; нечёткое управление.

Цитирование: 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

Введение

Объектом исследования является компонент системы наземного обслуживания ВС узлового аэропорта – его производственное подразделение, предназначенное для выполнения одной или нескольких сходных технологических операций и оснащённое соответствующими технологическими ресурсами. С позиций теории управления рассматриваемая подсистема служит примером системы управления (СУ), в которой в роли объекта управления (ОУ) выступают технологические ресурсы, а функции управляющего устройства (УУ) осуществляет человек-оператор (диспетчер аэропорта). При едином назначении технологические ресурсы, как правило, относятся к различным типам, отличающимся техническими и экономическими характеристиками (производительностью, стоимостью, расходами на эксплуатацию и пр.). В задачи оператора входит контроль за соблюдением временных рамок выполнения операции, определение типов и количества ресурсов, выделяемых для обслуживания того или иного ВС, маневрирование ресурсами в условиях массовых нарушений регулярности полётов и др. Пробле-

мой особенно актуальной для узловых аэропортов, с их интенсивными потоками ВС и жёсткими требованиями к соблюдению временных параметров технологических графиков наземного обслуживания, является определение оптимальных по критерию экономичности ресурсов отдельных подсистем. Ряд специфических черт аэропортов рассматриваемой категории делает имитационное статистическое моделирование наиболее предпочтительным методом решения названной оптимизационной задачи. Имитационная модель рассматриваемой СУ должна включать в качестве компонента модель УУ, воспроизводящую действия человека. Для формализации используемых оператором эвристических правил управления используются методы нечёткой логики. В рассматриваемой модели нечёткий логический регулятор является моделью стратегии оператора и таким образом служит моделью УУ. В настоящее время при всей многочисленности публикаций, связанных с нечётким управлением самыми разнообразными объектами, отсутствуют работы, в которых рассматривались бы вопросы нечёткого управления системами и процессами наземного обслуживания ВС и их загрузки в аэропорту.

Модель подсистемы наземного обслуживания ВС узлового аэропорта

Для формирования имитационной модели отдельной функциональной подсистемы узлового аэропорта вводится ряд не противоречащих практике допущений.

Всё разнообразие типов ВС, поступающих в подсистему на обслуживание, сводится к двум категориям. С уменьшением взлётной массы и пассажировместимости ВС порядковый номер θ ($\theta = 1, 2$) категории возрастает.

Благодаря особенностям расписания некоторый достаточно продолжительный промежуток времени функционирования узлового аэропорта может быть разбит на ряд временных интервалов, называемых «волнами» прилётов [1]. В течение каждой из «волн» интервал роста интенсивности потока прибывающих ВС сменяется интервалом снижения её до некоторого минимального значения. При этом соотношение между интенсивностями потоков ВС различных категорий не остаётся неизменным: «волна», как правило, инициируется массовыми прилётами ВС более высокой категории, что даёт возможность сократить время пересадки пассажиров. Указанные обстоятельства позволяют рассматривать мгновенную интенсивность потока прибывающих ВС $\lambda(t)$ как периодическую функцию времени с периодом T , равным продолжительности «волны» прилётов. Мгновенные вероятности $\pi_\theta(t)$ принадлежности прибывающих ВС θ -й категории также принимаются периодическими функциями времени с периодом T , для которых на всём T выполняется условие нормировки:

$$\sum_{\theta=1}^{\Theta} \pi_\theta(t) = 1, \quad \forall t \in [0, T].$$

Поскольку поток прибывающих в узловой аэропорт ВС может считаться пуассоновским [2], а операция случайного разделения пуассоновского потока даёт на выходе потоки такого же типа [3], то потоки ВС различных категорий также считаются пуассоновскими с мгновенными интенсивностями $\lambda_\theta(t)$ – периодическими функциями с периодом T :

$$\lambda_\theta(t) = \lambda(t) \cdot \pi_\theta(t), \quad \theta = 1, 2.$$

Обозначим $\lambda^{[0,T]}$, $\lambda_\theta^{[0,T]}$, $\pi_\theta^{[0,T]}$ сегменты функций соответственно $\lambda(t)$, $\lambda_\theta(t)$, $\pi_\theta(t)$, т.е. множества пар, включающих значения функций $\lambda(t)$, $\lambda_\theta(t)$, $\pi_\theta(t)$, которые они принимают в моменты времени t , и сами значения t в промежутке $0 \leq t \leq T$: $\lambda^{[0,T]} = \{(t, \lambda(t))\}_{0 \leq t \leq T}$, $\lambda_\theta^{[0,T]} = \{(t, \lambda_\theta(t))\}_{0 \leq t \leq T}$, $\pi_\theta^{[0,T]} = \{(t, \pi_\theta(t))\}_{0 \leq t \leq T}$.

Допустим, что подсистема располагает технологическими ресурсами двух групп с номерами ψ ($\psi = 1, 2$), специализирующимися на обслуживании ВС той или иной категории, при этом более производительные ресурсы 1-й группы рассчитаны на обслуживание ВС более высокой категории I. Предположим, что ресурсы одной группы могут использоваться для обслуживания ВС разных категорий, однако обслуживание ВС тех категорий, на которые ресурсы не рассчитаны, выполняется ими с меньшей производительностью. Будем считать, что для обслуживания любого ВС могут привлекаться как одна, так и несколько однотипных единиц ресурсов. Пусть объем работ Q_θ при обслуживании одного ВС θ -й категории – случайная величина (СВ) с заданной функцией распределения $F_{Q_\theta}(Q)$. Также СВ считаются численность $N_{\psi\theta}$ выделяемых единиц ресурсов и производительность $R_{\psi\theta}$ единицы ресурсов ψ -й группы при обслуживании ВС θ -й категории. Функции распределения указанных СВ $F_{R_{\psi\theta}}(R)$ и $F_{N_{\psi\theta}}(N)$ принимаются заданными для всех сочетаний $\theta = 1, 2$ и $\psi = 1, 2$. Продолжительность обслуживания любого ВС зависит от потребного при обслуживании объема работ, производительности и количества выделенных ресурсов.

Для моделирования логики управления процессом обслуживания ВС вводится ряд допущений. Предполагается, что задача оператора, управляющего обслуживанием, состоит в выборе группы ресурсов, в которую очередное ВС направляется на обслуживание. Задача решается в момент поступления ВС в подсистему. Практика показывает, что наиболее весомыми факторами, влияющими на решение оператора, следует считать, во-первых, число ВС, обслуживаемых и ожидающих обслуживания в подсистеме, и, во-вторых, число ВС, поступление которых в подсистему ожидается в течение ближайшего промежутка времени определенной продолжительности. Для этих характеристик вводятся обозначения: $x_1(t), x_2(t)$ – численности ВС категории соответственно I и II, поступление которых в подсистему ожидается в течение промежутка времени, начинающегося в момент времени t и заканчивающегося в момент времени $t + \Delta t^{ож}$, где $\Delta t^{ож}$ – некоторая заданная продолжительность временного промежутка; $x_3(t), x_4(t)$ – численности ВС, находящихся на обслуживании и обслуживаемых в момент времени t ресурсами 1-й и 2-й группы соответственно.

Логично считать, что помимо перечисленных факторов оператор принимает во внимание и целый ряд других (характеристики конкретного ВС, его загрузки, особенности выполняемой им перевозки и т.п.), с трудом поддающихся формализации, наличие которых делает факт выбора некоторого решения случайным. Вводится квадратная матрица переходных вероятностей $\|p_{\psi\theta}(t)\|$ с единичной суммой по столбцам, элемент которой $p_{\psi\theta}(t)$ представляет собой мгновенную вероятность направления на обслуживание в ψ -ю группу ресурсов поступающих ВС θ -й категории. Приняв заданными вероятности $p_{2,1}(t)$ и $p_{1,2}(t)$ и переобозначив их для краткости записи $y_1(t) \equiv p_{2,1}(t)$ и $y_2(t) \equiv p_{1,2}(t)$, определим $p_{1,1}(t)$ и $p_{2,2}(t)$ как

$$p_{1,1}(t) = 1 - y_1(t), \quad p_{2,2}(t) = 1 - y_2(t).$$

Таким образом, функции НР состоят в определении в любой момент времени t вероятностей $y_1(t)$ и $y_2(t)$ по заданным величинам $x_1(t), x_2(t), x_3(t), x_4(t)$:

$$y_\theta(t) = U_\theta(x_1(t), x_2(t), x_3(t), x_4(t)), \quad (1)$$

$$\theta = 1, 2,$$

где $U_\theta(\cdot)$ – алгоритм управления по каналу $y_\theta \equiv p_{\psi \neq \theta, \theta}(t)$.

Нестационарность и неоднородность поступающего потока ВС, сложный характер вероятностного распределения времени обслуживания ВС, наличие управления делают единственно возможным методом исследования динамики системы имитационное моделирование. Принципиальная блок-схема имитационной модели функциональной подсистемы узлового аэропорта приведена на рис. 1.

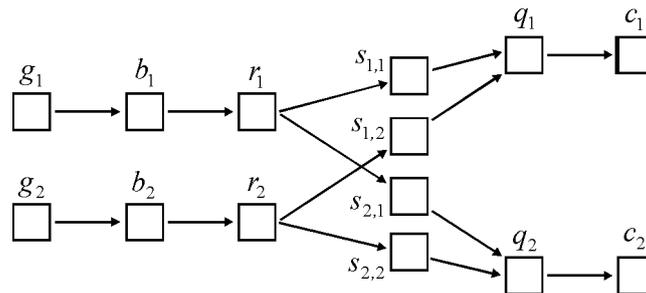


Рис. 1. Принципиальная блок-схема имитационной модели

Блоки g_θ , ($\theta = 1, 2$) предназначены для генерирования потоков заявок, имитирующих поступление сообщений о планируемом через фиксированное время Δt^{nn} прибытии на обслуживание в подсистему ВС θ -й категории. Имитационный эксперимент включает n^θ решений модели, каждое модельной продолжительностью T , в течение которых интенсивности потоков меняются согласно $\lambda_\theta^{[0, T]}$. Блоки b_θ задерживают заявки на промежуток модельного времени Δt^{nn} и обеспечивают сбор статистики по величинам $x_\theta(t)$, $\theta = 1, 2$. Блоки нечёткого регулятора r_θ ($\theta = 1, 2$) реализуют алгоритмы $U_\theta(\cdot)$. В момент t^z модельного времени входа очередной z -й ($z = 1, 2, \dots$) заявки, соответствующей ВС θ^z -й категории, в блок r_{θ^z} «срабатывает» алгоритм $U_{\theta^z}(\cdot)$. Блоки $s_{\psi \theta}$, $\psi(\theta = 1, 2)$ предназначены для определения значений параметров заявки. Для z -й ($z = 1, 2, \dots$) заявки, соответствующей некоторому ВС θ^z -й категории, направленному для обслуживания в ψ^z -ю группу ресурсов, определяются потребный объём работ Q^z , число выделенных единиц ресурсов N^z , фактическая производительность единицы ресурсов R^z , а также фактическое время обслуживания $t_{обсл}^z$ как реализации СВ Q_{θ^z} , $N_{\psi^z \theta^z}$, $R_{\psi^z \theta^z}$ соответственно. Значение $t_{обсл}^z$ с учётом введенных выше допущений рассчитывается как

$$t_{обсл}^z = \frac{Q^z}{R^z N^z}. \quad (2)$$

Блоки q_ψ ($\psi = 1, 2$) моделируют занятие заявкой определённого ранее числа единиц ресурсов из ψ -й группы, задержку заявки на рассчитанное согласно (2) модельное время и затем освобождение занятых заявкой ресурсов. В назначение блоков входит также сбор статистики по использованию ресурсов и характеристикам очереди. Блоки c_ψ ($\psi = 1, 2$) осуществляют вывод заявок из модели.

Нечёткое управление в модели подсистемы наземного обслуживания ВС узлового аэропорта

Структура модели СУ с НР приведена на рис. 2. ОУ характеризуется множествами зависящих от времени входных управляющих переменных $Y(t)$, выходных переменных $X(t)$, а также переменных $\Lambda(t)$, описывающих внешние неуправляющие воздействия, обусловленные случайными процессами поступления в подсистему и обслуживания ВС. На вход НР дискретно, в определённые моменты времени, поступают элементы вектора X , являющиеся определёнными величинами. На выходе НР с использованием алгоритма нечёткого логического вывода формируется множество значений элементов вектора Y , также являющиеся определёнными.

В любой модельный момент времени $t \in [0, T]$ вектор выходных переменных НР $Y = (y_1, y_2)$ связан с вектором его входных переменных $X = (x_1, \dots, x_4)$ соотношением (1) или в более общем виде:

$$Y = U(X), \tag{3}$$

где $U = (U_1, U_2)$ – вектор-функция, устанавливающая связь между X и Y . Области изменения входных переменных совпадают с множеством целых неотрицательных чисел $\mathbf{Z}_{\geq 0}$. Область изменения выходных вероятностей y_1, y_2 естественным образом определяется как отрезок $[0, 1]$.

Задача НР состоит в том, чтобы, реализуя управление U , аппроксимирующее управление человеком-оператором «реальной» системой, на основе информации о векторе X определить решение Y .

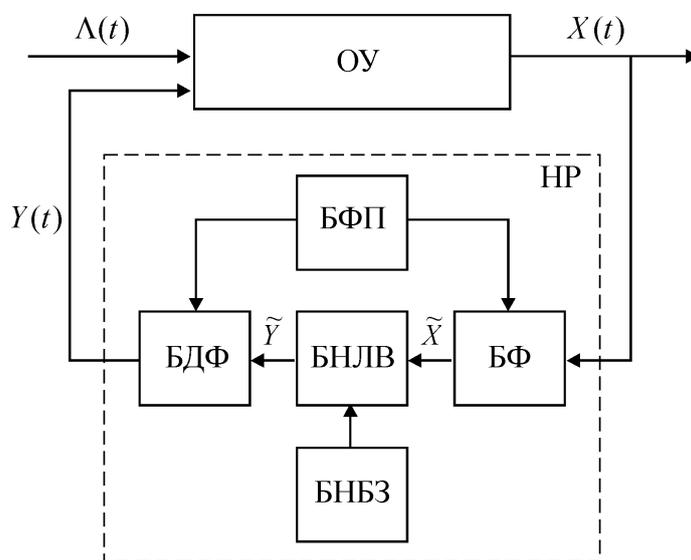


Рис. 2. Структура модели СУ с НР

Будем различать измеряемые переменные x_1, \dots, x_4 , принимающие числовые значения из множества $\mathbf{Z}_{\geq 0}$, и соответствующие им лингвистические переменные β_1, \dots, β_4 , принимающие лингвистические значения, заданные на том же универсальном множестве $\mathbf{Z}_{\geq 0}$. Для оценки входных лингвистических переменных используются термы из

терм-множеств T_i^β , $i=1, \dots, 4$, где $T_i^\beta = \{\tilde{\alpha}_i^1, \tilde{\alpha}_i^2, \dots, \tilde{\alpha}_i^{L_i}\}$ – терм-множество лингвистической переменной β_i , а $\tilde{\alpha}_i^l$ – l -й лингвистический терм переменной β_i , $l=1, \dots, L_i$. Лингвистические термы $\tilde{\alpha}_i^l \in T_i^\beta$, $l=1, \dots, L_i$, $i=1, \dots, 4$ являются заданными на универсальном множестве $Z_{\geq 0}$ дискретными нечёткими числами, определяемыми как

$$\tilde{\alpha}_i^l = \sum_{x_i \in Z_{\geq 0}} \mu_{\tilde{\alpha}_i^l}(x_i) / x_i, \quad i=1, \dots, 4,$$

где $\mu_{\tilde{\alpha}_i^l}(x_i)$ – функция принадлежности значения входной переменной $x_i \in [x_i^H, x_i^B]$ терму $\tilde{\alpha}_i^l \in T_i^\beta$, $l=1, \dots, L_i$, $i=1, \dots, 4$.

Аналогично, выходным переменным y_1, y_2 , принимающим числовые значения на промежутке $[0, 1]$, поставим в соответствие выходные лингвистические переменные ω_1, ω_2 с лингвистическими значениями, заданными на том же промежутке. Для оценки ω_1, ω_2 используются термы из терм-множеств T_j^ω , $j=1, 2$, где $T_j^\omega = \{\tilde{\xi}_j^1, \tilde{\xi}_j^2, \dots, \tilde{\xi}_j^{K_j}\}$ – терм-множество лингвистической переменной ω_j , а $\tilde{\xi}_j^k$ – k -й лингвистический терм переменной ω_j , $k=1, \dots, K_j$. Термы $\tilde{\xi}_j^k \in T_j^\omega$, $k=1, \dots, K_j$, $j=1, 2$ являются нечёткими числами, заданными на универсальном множестве $[0, 1]$, и определяются как

$$\tilde{\xi}_j^k = \int_{y_j \in [0, 1]} \mu_{\tilde{\xi}_j^k}(y_j) / y_j, \quad j=1, 2,$$

где $\mu_{\tilde{\xi}_j^k}(y_j)$ – функция принадлежности значения входной переменной $y_j \in [0, 1]$ терму $\tilde{\xi}_j^k \in T_j^\omega$, $k=1, \dots, K_j$, $j=1, 2$.

Для выполнения процедуры нечёткого логического вывода, состоящего в построении зависимости между входными и выходными переменными на основе логических правил и операций над нечёткими множествами, в состав нечёткого регулятора входит блок нечёткой базы знаний (БНБЗ) (рис. 2), включающий совокупность нечётких логических правил – нечёткую базу знаний. Логическим правилом называется конструкция вида:

ЕСЛИ <Условие правила>, ТО <Заключение правила>,

где Условие правила, Заключение правила – утверждения, состоящие из одного или нескольких нечётких высказываний вида « β есть $\tilde{\alpha}$ », соединённых логическими связками «И», «ИЛИ»; β – лингвистическая переменная; $\tilde{\alpha}$ – терм лингвистической переменной β . В рассматриваемом нечётком регуляторе использованы логические правила, содержащие составные конъюнктивно-дизъюнктивные (образованные с использованием связок «И», «ИЛИ») высказывания в условиях и простые высказывания в заключениях. Для j -й ($j=1, 2$) выходной переменной набор включает K_j правил вида:

ЕСЛИ $((\beta_1 = \tilde{\alpha}_{1,j}^{(k,1)}$ И ... И $\beta_4 = \tilde{\alpha}_{4,j}^{(k,1)})$ ИЛИ ...
 $(\beta_1 = \tilde{\alpha}_{1,j}^{(k,m)}$ И ... И $\beta_4 = \tilde{\alpha}_{4,j}^{(k,m)})$ ИЛИ ...
 $(\beta_1 = \tilde{\alpha}_{1,j}^{(k,m^k)}$ И ... И $\beta_4 = \tilde{\alpha}_{4,j}^{(k,m^k)})$), ТО $(\omega_j = \tilde{\xi}_j^k)$,
 $k=1, \dots, K_j, j=1, 2$,

где k – номер правила в базе нечётких правил выходной лингвистической переменной ω_j ; m_j^k – число составных высказываний конъюнктивного (образованного с использованием связки «И») типа, образующих составное высказывание конъюнктивно-дизъюнктивного типа в условии k -го правила в базе нечётких правил ω_j ; $m = 1, \dots, m_j^k$ – номер составного высказывания конъюнктивного типа в условии k -го правила в базе нечётких правил ω_j ; $\tilde{\alpha}_{i,j}^{(k,m)} \in T_i^{\beta}$ – значение входной лингвистической переменной β_i , используемое при формировании m -го конъюнктивного высказывания в условии k -го правила в базе нечётких правил ω_j , $i = 1, \dots, 4$; $\tilde{\xi}_j^k \in T_j^{\omega}$ – значение выходной лингвистической переменной ω_j , используемое при формировании заключения k -го правила в базе нечётких правил ω_j . С использованием символов операций \cup («ИЛИ») и \cap («И») записанная система высказываний может быть переписана в компактной форме:

$$\bigcup_{m=1}^{m_j^k} \left[\bigcap_{i=1}^4 (\beta_i = \tilde{\alpha}_{i,j}^{(k,m)}) \right] \Rightarrow \omega_j = \tilde{\xi}_j^k, \quad (4)$$

$$k = 1, \dots, K_j, \quad j = 1, \dots, J.$$

База знаний трактуется [4] как разбиение пространства входных переменных на подобласти с размытыми границами. Размытость границ подобластей означает, что одновременно, но с различными степенями, могут выполняться несколько заключений и, следовательно, выходные переменные, полученные в результате вывода по всей базе знаний, также будут нечёткими величинами, заданными на универсальном множестве $[0,1]$:

$$\tilde{y}_j = \int_{y_i \in [0,1]} \mu_{\tilde{y}_j}(y) / y, \quad j = 1, \dots, J,$$

где $\mu_{\tilde{y}_j}(y_j)$ – функция принадлежности значения переменной $y \in [0,1]$ нечёткому множеству \tilde{y}_j . Определение результирующей функции принадлежности $\mu_{\tilde{y}_j}(y_j)$ и является целью нечёткого логического вывода.

Алгоритм, реализуемый блоком нечёткого логического вывода (БНЛВ) (рис. 2), являющимся главным блоком нечёткого регулятора, включает следующие шаги [4].

1. Определение степеней выполнения условий отдельных правил базы знаний (4) («агрегирование подусловий»). Для определения степени $h_j^k(X)$ выполнения условия k -го правила из базы правил лингвистической переменной ω_j используется выражение

$$h_j^k(X) = \max_{m=1, \dots, m_j^k} \left[\min_{i=1, \dots, 4} \mu_{\tilde{\alpha}_{i,j}^{(k,m)}}(x_i) \right], \quad (5)$$

$$k = 1, \dots, K, \quad j = 1, 2.$$

2. Модификация функций принадлежности заключений отдельных правил с учётом степеней выполнения их условий («активизация заключений»). Модифицированная функция принадлежности $\mu_{\tilde{\xi}_j^k}(y)$ заключения k -го правила из базы правил ω_j определяется на базе исходной функции принадлежности $\mu_{\xi_j^k}(y)$ согласно следующему выражению:

$$\mu_{\xi_j^{*k}}(y) = \min \left[h_j^k(X), \mu_{\xi_j^k}(y) \right],$$

$$k = 1, \dots, K, j = 1, 2.$$

3. Определение результирующей функции принадлежности («аккумуляция заключений»):

$$\mu_{\tilde{y}_j}(y) = \max_{k=1, \dots, K_j} \mu_{\xi_j^{*k}}(y).$$

Как следует из (5), для выполнения нечёткого логического вывода предварительно должна быть выполнена процедура фаззификации, цель которой состоит в установлении соответствия между числовыми значениями входных переменных и значениями функций принадлежности соответствующих термов входных лингвистических переменных. Результатом фаззификации, выполняемой блоком фаззификации (БФ) (рис. 2), является множество значений $\mu_{\tilde{\alpha}_{i,j}^{(k,m)}}(x_i)$, $m = 1, \dots, m^k$, $k = 1, \dots, K_j$, $i = 1, \dots, 4$, $j = 1, 2$, присутствующих в (5). Для хранения функций принадлежности, используемых для представления лингвистических термов в виде нечётких множеств, предназначен блок функций принадлежности (БФП) (рис. 2).

Полученные в результате нечёткого вывода выходные нечёткие множества \tilde{y}_1 и \tilde{y}_2 приводятся блоком дефаззификации (БДФ) (рис. 2), реализующим один из методов дефаззификации [5], к чёткой форме y_1 и y_2 , используемой при управлении системой.

Постановка задачи

Необходимо определить минимально необходимое в аэропорту число ресурсов n_{ψ}^{\min} ($\psi = 1, 2$) таким образом, чтобы оно было достаточным для обслуживания ВС без ожидания в подавляющем большинстве случаев. Поскольку процесс поступления ВС на обслуживание и характеристики обслуживания случайны, то и число $N_{\psi}(t)$ ресурсов ψ -й группы, потребное в момент $t \in [0, T]$ для обслуживания поступивших ВС, представляет собой случайный процесс с функцией распределения $F_{N_{\psi}}(n, t) = P\{N_{\psi}(t) < n\}$, определяемой в результате серии решений имитационной модели, включающей ИР с заданными параметрами. Число $n_{\psi}(t)$ ресурсов, выделенное диспетчером в момент $t \in [0, T]$, должно быть минимальным, но достаточным для того, чтобы вероятность возникновения дефицита ресурсов для обслуживания очередного поступившего ВС, определяемая как $P\{N_{\psi}(t) > n_{\psi}(t)\}$, была приемлемо мала. При заданной вероятности p_{ψ}^3 недостатка ресурсов ψ -й группы минимально необходимое в момент $t \in [0, T]$ число ресурсов $n_{\psi}^{\min}(t)$ определится как наименьшее $n_{\psi}(t)$, удовлетворяющее условию

$$P\{N_{\psi}(t) > n_{\psi}(t)\} \leq p_{\psi}^3, \quad \psi = 1, 2.$$

Наибольшая из множества полученных величин $\{n_{\psi}^{\min}(t), t \in [0, T]\}$ очевидно и будет искомой n_{ψ}^{\min} :

$$n_{\psi}^{\min} = \max_{t \in [0, T]} \left[\min \left(\begin{array}{l} n_{\psi}(t) \in Z_{\geq 0} : \\ : P\{N_{\psi}(t) > n_{\psi}(t)\} \leq p_{\psi}^3 \end{array} \right) \right],$$

$\psi = 1, 2.$

Таким образом, рассматриваемая задача состоит в поиске n_{ψ}^{\min} для заданных характеристик потоков ВС и процесса обслуживания $\lambda_{\theta}^{[0, T]}$, $F_{Q_{\theta}}(Q)$, $F_{R_{\psi\theta}}(R)$, $F_{N_{\psi\theta}}(N)$, $\psi = 1, 2$ и $\theta = 1, 2$ с учётом заданного нечёткого управления $U(\cdot)$.

Модельный пример решения задачи

Рассматривается одна из ключевых операций технологического графика наземного обслуживания ВС – заправка авиатопливом, выполняемая авиатопливозаправщиками (АТЗ). Предполагается, что при обслуживании ВС категории I АТЗ 2-й группы всегда выделяется два АТЗ. Во всех остальных случаях используется один АТЗ. Распределения СВ Q_{θ} и $R_{\psi\theta}$ для всех ψ и θ приняты нормальными со средними: $M[Q_1] = 40 \text{ м}^3$, $M[Q_2] = 16 \text{ м}^3$, $M[R_{1,1}] = 1.5 \text{ м}^3/\text{мин}$, $M[R_{1,2}] = 0.9 \text{ м}^3/\text{мин}$, $M[R_{2,1}] = 0.8 \text{ м}^3/\text{мин}$, $M[R_{2,2}] = 1.0 \text{ м}^3/\text{мин}$. Приняты следующие значения коэффициентов вариации: $k_R = 0.15$ – для СВ $R_{\psi\theta}$ при всех ψ и θ ; $k_Q = 0.25$ – для СВ Q_{θ} при всех θ . Все перечисленные исходные данные вполне согласуются с практикой.

В модели НР использует четыре входные лингвистические переменные:

- β_1 = «Число ожидаемых за интервал времени Δt^{ni} ВС категории I»,
- β_2 = «Число ожидаемых за интервал времени Δt^{ni} ВС категории II»,
- β_3 = «Число ВС, ожидающих заправки и заправляемых 1-й группой АТЗ»,
- β_4 = «Число ВС, ожидающих заправки и заправляемых 2-й группой АТЗ»,

которым соответствуют четыре измеряемые входные переменные НР: $x_1(t), x_2(t), x_3(t), x_4(t)$. Лингвистические термы переменных β_1 и β_2 следующие: $\tilde{\alpha}_1^1 = \tilde{\alpha}_2^1 =$ «небольшое число» (S), $\tilde{\alpha}_1^2 = \tilde{\alpha}_2^2 =$ «большое число» (B). Лингвистические термы переменных β_3 и β_4 : $\tilde{\alpha}_3^1 = \tilde{\alpha}_4^1 =$ «небольшое число» (S), $\tilde{\alpha}_3^2 = \tilde{\alpha}_4^2 =$ «среднее число» (M), $\tilde{\alpha}_3^3 = \tilde{\alpha}_4^3 =$ «большое число» (B). Термы представлены простыми и широко используемыми нечёткими величинами с многоугольными функциями принадлежности, для которых выполняется условие разбиения единицы. В общем виде графики функций принадлежности, используемых для термов лингвистических переменных β_1 и β_2 , представлены на рис. 3, а, для β_3 и β_4 – на рис. 3, б.

Предположим, что экспертно определены следующие значения координат опорных точек функций принадлежности, отражающие суждения оператора при работе с имеющейся в аэропорту численностью АТЗ: $x_1^{(1)} = 5$, $x_1^{(2)} = 11$, $x_2^{(1)} = 3$, $x_2^{(2)} = 8$, $x_3^{(1)} = 5$, $x_3^{(2)} = 9$, $x_3^{(3)} = 12$, $x_3^{(4)} = 15$, $x_4^{(1)} = 2$, $x_4^{(2)} = 5$, $x_4^{(3)} = 9$, $x_4^{(4)} = 12$.

Множество выходных лингвистических переменных включает два элемента:

- ω_1 = «Вероятность направления ВС категории I ко 2-й группе АТЗ»,
- ω_2 = «Вероятность направления ВС категории II к 1-й группе АТЗ» с соответствующими им выходными переменными $p_{1,2}(t)$ и $p_{2,1}(t)$. Для описания нечёткости обеих входных переменных используются терм-множества в составе трёх лингвистиче-

ских термов: $\tilde{\xi}_1^1 = \tilde{\xi}_2^1 =$ «вероятность мала» (S), $\tilde{\xi}_1^2 = \tilde{\xi}_2^2 =$ «вероятность средняя» (M), $\tilde{\xi}_1^3 = \tilde{\xi}_2^3 =$ «вероятность велика» (B). График используемых функций принадлежности термов представлен на рис. 3, в. Дефаззификация результирующих нечётких чисел выполняется согласно расширенному методу центра тяжести [5].

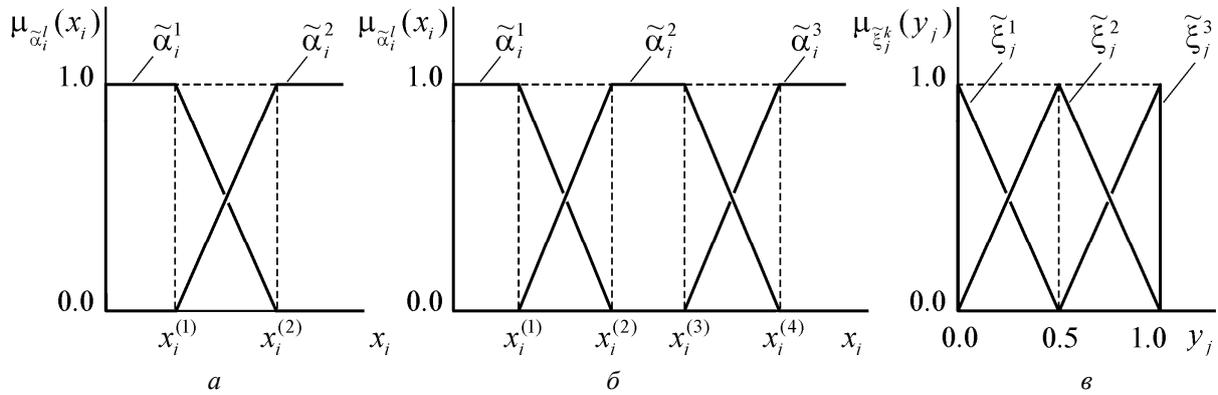


Рис. 3. Функции принадлежности термов лингвистических переменных

Нечёткая база правил для входных лингвистических переменных β_1, \dots, β_4 и выходных – ω_1, ω_2 представлена в форме табл. 1.

Таблица 1. Нечёткая база правил управления подсистемой заправки ВС

β_1	β_2	β_3	β_4	ω_1	β_1	β_2	β_3	β_4	ω_1	β_1	β_2	β_3	β_4	ω_2	β_1	β_2	β_3	β_4	ω_2		
B	B	B	S	B	B	S	S	M	S	S	B	S	M	B	B	S	S	S	S		
B	S	B	S		B	S	S	B		B	B	S	B		S	B	B	S		S	M
B	S	B	M		B	B	M	M		M	B	B	S		M	B	B	B		M	M
B	S	M	S		B	B	M	B		B	B	B	S		M	M	B	B		M	M
S	S	B	S		S	B	B	B		M	B	B	S		B	B	B	B		M	B
B	B	B	M	M	S	B	B	B	S	B	S	S	B	M	B	S	M	S	S		
B	S	B	B		S	S	B	B		B	B	S	S		B	B	B	S		M	M
B	S	S	S		S	B	S	S		S	S	S	S		S	M	B	S		B	S
B	B	M	S		S	B	S	M		M	S	B	M		M	M	S	B		B	M
B	S	M	M		S	B	S	B		B	S	B	M		B	B	S	B		B	B
S	B	B	S	S	S	S	S	S	S	B	B	B	S	S	S	S	B	S	S		
S	S	B	M		S	S	S	M		M	B	B	B		M	B	S	S		B	M
S	S	M	S		S	S	S	B		B	B	B	B		B	B	S	S		B	B
B	B	B	B		S	B	M	S		S	S	S	B		S	S	S	S		S	S
B	B	S	S		S	B	M	M		M	B	S	B		M	M	S	B		M	S
B	B	S	M	S	S	B	M	B	S	B	S	B	B	S	S	S	M	S	S		
B	B	S	B		S	S	M	M		M	B	S	B		B	B	S	S		M	S
B	B	S	B		S	S	M	M		M	B	B	S		S	S	S	S		M	M

Характеристики модельной волны прилётов ВС, полученные в результате обработки расписания одного из европейских хабов, представлены на рис. 4, а. Основные результаты решения рассматриваемой задачи для вероятности $p^3 = 0.95$, одинаковой для обеих групп АТЗ, отображены на рис. 4, б – г. Как следует из графиков рис. 4, а, моменты пиковых нагрузок на подсистему топливозаправки, связанные с поступлением ВС двух категорий, не совпадают: максимальный уровень интенсивности потока ВС

категории I приблизительно на один час «опережает» максимум интенсивности потока ВС категории II. Эта особенность модельной волны даёт возможность управляющему алгоритму перераспределять потоки ВС между группами АТЗ с целью выравнивания нагрузки. Действительно, из рис.4, б следует, что на начальной стадии модельной волны во время массового поступления ВС категории I до 35-38% их общего числа направляются на заправку к АТЗ 2-й группы. При этом в остальное время указанная доля не превышает 20%. Напротив, в течение первых 1.5 ч модельной волны, когда поток ВС категории II сравнительно слаб, а АТЗ 1-й группы загружены обслуживанием ВС категории I, вероятность направления к АТЗ этой группы ВС категории II в среднем составляет только около 0.1. Лишь к концу волны, по мере освобождения АТЗ 1-й группы, вероятность направления к ним ВС категории II существенно возрастает.

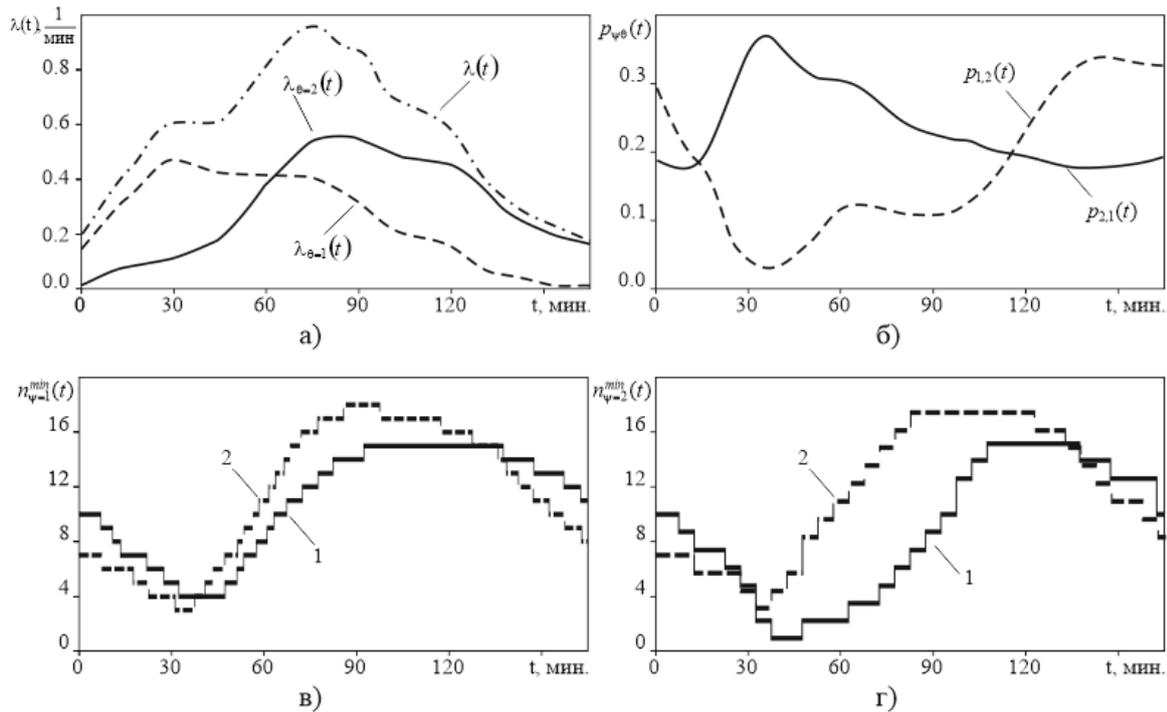


Рис. 4. Исходные данные и результаты моделирования

Реализация управления, моделируемого НР, не только делает нагрузку на АТЗ более равномерной как по времени, так и по группам АТЗ, но также обеспечивает и сокращение суммарной численности АТЗ, необходимой аэропорту. Данный вывод подтверждается сравнением зависимостей $n_{\psi}^{\min}(t)$, полученных на моделях с НР (на рис. 4, в и 4, г графики (1)) и без него (на указанных рисунках – графики (2)). В последнем случае предполагается, что все ВС категории I направляются для обслуживания к АТЗ 1-й группы, а ВС категории II – к АТЗ 2-й группы. Суммарное минимально необходимое в аэропорту число АТЗ, достигнутое с использованием НР, составляет $n_{\psi=1}^{\min} + n_{\psi=2}^{\min} = 15 + 15 = 30$, и на две единицы меньше величины, полученной без управления. Увеличение на одну единицу минимально необходимого числа АТЗ 2-й группы, вызванное реализацией нечёткого управления, компенсируется сокращением на три единицы минимально необходимого числа более затратных АТЗ 1-й группы.

Заключение

Результаты решения рассмотренной задачи свидетельствуют о возможности и целесообразности использования нечёткого регулятора в качестве модели стратегии человека-оператора, управляющего технологическими процессами аэропорта. Имитационным моделированием подтверждена необходимость реализуемого в аэропортовой практике управления потоками ВС в рамках подсистем наземного обслуживания, особенно актуальная для узловых аэропортов.

Библиографический список

1. Dennis N. Developments of Hubbing at European Airports // Air and Space Europe. 2001. V. 3, Iss. 1-2. P. 51-55. DOI: 10.1016/s1290-0958(01)90015-2
2. Романенко В.А. Моделирование производственных процессов узловых аэропортов. Saarbrücken: LAP Lambert Academic Publishing, 2012. 286 с.
3. Гнеденко Б.В., Коваленко И.Н. Введение в теорию массового обслуживания. М.: Наука, 1987. 400 с.
4. Штовба С.Д. Проектирование нечётких систем средствами MATLAB. М.: Горячая линия – Телеком, 2007. 288 с.
5. Пегат А. Нечёткое моделирование и управление. М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2013. 798 с.

OPTIMIZATION OF PARAMETERS OF A HUB AIRCRAFT GROUND HANDLING SYSTEM ON THE BASIS OF A FUZZY-CONTROLLER SIMULATION MODEL

© 2017

I. A. Vasileva postgraduate student of the Department of Aircraft Maintenance;
Samara National Research University, Samara, Russian Federation;
irina.vasileva.14@mail.ru

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

T. V. Khvostova postgraduate student of the Department of Transportation Management and Control;
Samara National Research University, Samara, Russian Federation;
sorokina1605@gmail.com

The paper deals with the problem of determining the optimum amount of technological resources of a hub functional subsystem, performing ground handling of aircraft (AC) for purposes of a chosen process step. A simulation model is proposed to be used for the optimization. The simulation model takes into account the peculiarities of the hub work activity and includes a fuzzy controller (FC) that reflects the logic of the airport controller who manages the process of aircraft ground handling. A model example of the solution of an optimization problem is presented. The example indicates the possibility and feasibility of using a fuzzy controller to model a human operator's strategy.

Hub airport; ground handling; technological resources; optimization; simulation model; fuzzy control.

Citation: 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

References

1. Dennis N. Developments of Hubbing at European Airports. *Air and Space Europe*. 2001. V. 3, Iss. 1-2. P. 51-55. DOI: 10.1016/s1290-0958(01)90015-2
2. Romanenko V.A. *Modelirovanie proizvodstvennykh protsessov uzlovykh aeroportov* [Hub process simulation]. Saarbrucken: LAP Lambert Academic Publishing, 2012. 286 p.
3. Gnedenko B.V., Kovalenko I.N. *Vvedenie v teoriyu massovogo obsluzhivaniya* [Introduction to the queuing theory]. Moscow: Nauka Publ., 1987. 400 p.
4. Shtovba S.D. *Proektirovanie nechetkikh system sredstvami MATLAB* [Design of fuzzy systems by means of MATLAB]. Moscow: Goryachaya Liniya – Telekom Publ., 2007. 288 p.
5. Piegat A. *Fuzzy Modeling and Control*. Heidelberg: Physica-Verlag, 2001. 728 p.