



УДК 629.7.351

А. Ю. Княжский, А. П. Плясовских

## Повышение пропускной способности взлетно-посадочной полосы с использованием менеджера вылетов воздушных судов

Предложен принцип работы электронного менеджера вылетов воздушных судов *Departure Manager (DMAN)*, формирующий рекомендации диспетчеру по упорядочиванию очереди задержанных воздушных судов, что позволяет минимизировать время занятости взлетно-посадочной полосы. Определены требования к менеджеру и возможность его интеграции в систему управления воздушным движением. Результаты моделирования показали целесообразность внедрения электронного менеджера в наиболее загруженные аэропорты и возможность возрастания пропускной способности взлетно-посадочной полосы более чем на 6 % при его использовании.

**Ключевые слова:** пропускная способность, взлетно-посадочная полоса, эффективность, воздушные суда, оптимизация, вылеты.

### Введение

Важнейшими показателями эффективности работы взлетно-посадочной полосы (ВПП) являются ее пропускная способность и среднее время задержки рейсов, ожидающих своей очереди вылета и захода на посадку. Снижение времени задержки рейсов приводит к уменьшению расхода топлива и, как следствие, увеличению экономической прибыли от перевозок, снижению объема выбросов углекислого газа в атмосферу. Для увеличения пропускной способности ВПП и разгрузки диспетчера предлагается разработать менеджер вылетов – *Departure Manager (DMAN)*, который оптимизирует очередь вылетающих воздушных судов (ВС) по критериям минимума времени занятости ВПП, минимума средней задержки рейсов (минимум расхода топлива и выброса вредных веществ в атмосферу). Актуальность решения данной задачи подтверждена рекомендациями глобального аэронавигационного плана [1], а также рядом исследований [2, 3].

Входные данные для *DMAN*: текущие параметры движения ВС; характеристики ВС; план полетов; информация о занятости и режиме работы ВПП. На выходе *DMAN* выдает рекомендации диспетчеру по управлению потоком вылетающих ВС. Конечное решение об управлении потоком принимает диспетчер. Таким образом *DMAN* разгружает внимание диспетчера, выполняя за него типовые операции и учитывая большее количество влияющих на решение факторов, чем способен запомнить человек.

Из-за турбулентности в спутном следе вылетающие ВС должны соблюдать определенные в федеральных авиационных правилах интервалы между моментами вылета. Чем больше масса первого ВС и меньше масса второго ВС, тем длиннее интервал между моментами времени их вылетов. В зависимости от массы обоих ВС эти интервалы составляют 1...3 мин. Очередь оптимизируется выбором последовательности ВС, имеющей наибольшее/наименьшее значение критерия оптимизации. Например, при которой суммарная занятость ВПП занимает меньше времени.

### Постановка задачи

Задача – определить зависимость времени снижения средней задержки вылета ВС от интенсивности потока вылетающих ВС за счет упорядочивания очереди из задержанных на вылете ВС. Упорядочивание проводится по критерию минимального времени занятия ВПП очередью. Также проведем расчет, на сколько можно повысить пропускную способность ВПП за счет упорядочивания очереди. Определим требования к *DMAN*, его источники и потребители информации.

### Требования к *DMAN*

Проект *DMAN* должен быть реализован в виде отдельного универсального программного модуля, легко встраиваемого в автоматизированную систему управления воздушным (АС УВД) движением без изменения сетевых интерфейсов других модулей и нарушения ее целостности. Исходя из этого, определим требования к нему:

- способность адаптироваться к любой архитектуре аэропорта;

© Княжский А. Ю., Плясовских А. П., 2019



- модульная архитектура, позволяющая изменять конфигурацию в зависимости от типов и количества источников и потребителей информации;

- достаточно высокая надежность работы и достоверность информации;

- выдача полной информации, потребляемой уже разработанными ЧМИ, обработка поступающих с них команд ядром вычислений *DMAN*;

- возможность работы в режиме обработки вылетов в порядке очереди («первый зарегистрировался – первый вылетел») и в режиме оптимизации очереди по критериям минимума занятия ВПП или минимума расхода топлива, с учетом ограничений на максимальное время задержки вылета и приоритетов ВС;

- возможность взаимодействовать с системой организации потоков прибывающих ВС *Arrival Manager (AMAN)* и системой управления аэродромным движением.

Схема взаимодействия *DMAN* с другими модулями АС УВД показана на рис. 1. Источниками информации для модуля маршрутизации являются РЛС, оптические камеры аэродромного наблюдения и системы автоматически зависящего наблюдения-вещания (АЗН-В) ВС, для *AMAN* – районные РЛС и АЗН-В ВС.

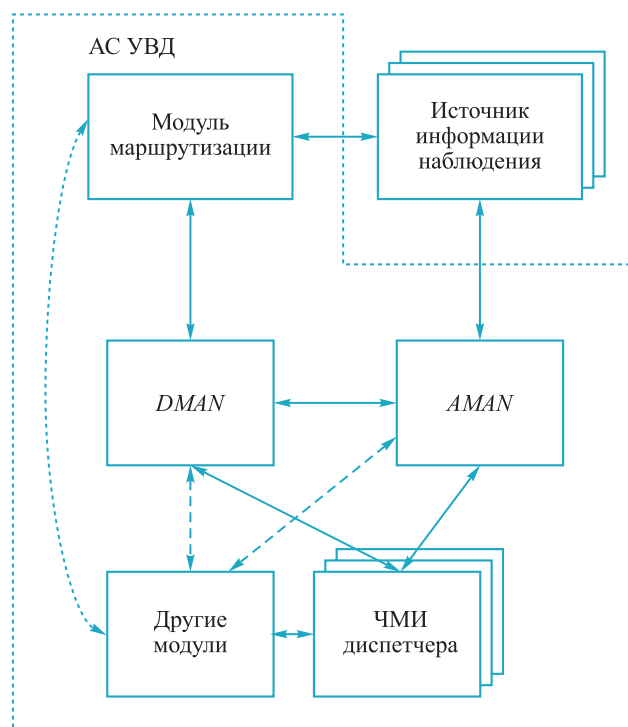


Рис. 1. Взаимодействие *DMAN* с другими модулями системы

*DMAN* принимает слоты вылета с *AMAN*. С *DMAN* на *AMAN* поступают временные интервалы занятости ВПП вылетающими ВС. На модуль маршрутизации *DMAN* отправляет начальную и конечную точки маршрутов ВС и плановое время предварительного старта. С модуля маршрутизации *DMAN* принимает маршрут руления в виде последовательности 4D-точек. Также *DMAN* принимает плановую информацию с модуля планирования и использования воздушного пространства, может принимать метеорологическую информацию с метеомодуля.

При упорядочивании очереди необходимо учитывать следующие параметры:

- интенсивность взлета и посадки на ВПП;

- пропускная способность ВПП;

- слоты вылетов на ВПП;

- маршруты ВС и техники при аэродромном движении;

- спутный след ВС, зависящий от их массы и типа;

- стандартные маршруты влета (*SID*) и скоростные характеристики ВС;

- приоритет и время задержки ВС;

### Оптимизация очереди

Оптимизация заключается в минимизации средней задержки вылетов ВС

$$\Delta W = \sum_{i=1}^N (t_i^{\text{факт}} - t_i^{\text{план}}),$$

где  $N$  – количество вылетевших ВС;

$t_i^{\text{факт}}$  – фактическое время вылета ВС;

$t_i^{\text{план}}$  – плановое время вылета ВС.

Фактическое время вылета зависит от порядка впереди идущих ВС, классифицируемых по максимальной взлетной массе.

Основными параметрами, вызывающими задержку являются временные интервалы между взлетами ВС, которые установлены Федеральными авиационными правилами в зависимости от времени ожидания рассеяния спутного следа за ВС  $t_i^{\text{ож}}$ .  $t_i^{\text{ож}}(m_i, m_{i-1})$  зависит от массы  $m_i$  текущего  $i$ -го и предыдущего  $m_{i-1}$  ( $i-1$ -го) вылетающих ВС [4]. Чем больше максимальная взлетная масса предыдущего ВС и меньше последующего, тем дольше время ожидания.



В соответствии с классификацией ICAO Doc 8643 ВС по взлетной массе можно разделить на 3 типа: легкие, средние и тяжелые. В таком случае всего будет 9 значений времени задержки, соответствующих всем комбинациям пар из 3 типов. Значения времени задержки удобно хранить в виде матрицы  $T_{ож}^{3 \times 3}$ , диагональные элементы которой равны. Для гражданских воздушных судов на территории России элементы матрицы  $T_{ож}^{3 \times 3}$  определяются Федеральными авиационными правилами Российской Федерации.

Интервал времени  $t_i^{ож}$  минимизируется за счет изменения порядка ВС в очереди. При формировании порядка необходимо учитывать скорости ВС, чтобы исключить пересечение 4D-траекторий ВС.

Среднее время задержки ВС на  $l$ -й ВПП  $\bar{\tau}_l$  определяется по формуле

$$\bar{\tau}_l = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N t_i^{ож},$$

где  $N$  – количество взлетевших с ВПП ВС.

При привязке мест стоянки ВС к нескольким ВПП нужно минимизировать суммарное среднее время задержки по всем ВПП:

$$\bar{\tau}_\Sigma = \sum_{l=1}^{N_{ВПП}} \bar{\tau}_l \rightarrow \min.$$

Здесь  $N_{ВПП}$  – количество ВПП.

Эффективность упорядочивания вылетов определяется по формуле

$$\chi_\Sigma = \frac{\bar{\tau}_\Sigma}{\bar{\tau}_\Sigma^*},$$

где  $\bar{\tau}_\Sigma$  – среднее время задержки вылетов с аэродрома без оптимизации очереди;

$\bar{\tau}_\Sigma^*$  – среднее время задержки вылетов с аэродрома при оптимизации очереди.

### Потенциальные возможности увеличения пропускной способности ВПП

В соответствии с Федеральными авиационными правилами Российской Федерации определим минимальные временные интервалы (см. таблицу) между двумя соседними вылетающими ВС [5]. ВС подразделяются по массе на легкие (Л) – менее 7000 кг, средние (С) – более 7000 кг и менее 136 000 кг, тяжелые (Т) – более 136 000 кг.

Минимальные временные интервалы между ВС

Первый	Второй		
	Легкие	Средние	Тяжелые
Легкие	1	1	1
Средние	3	1	1
Тяжелые	3	2	2

На примере очереди на вылет, состоящей из 2 легких, 2 средних и 2 тяжелых ВС определим оптимальную и наихудшую последовательности вылетов. Наихудшая последовательность, при которой имеет место наибольшее время занятости ВПП, выглядит следующим образом: Т С Л Т С Л. Эта последовательность обеспечивает  $2 + 3 + 1 + 2 + 3 + 1 = 12$  минут занятости ВПП. Оптимальная последовательность, при которой обеспечивается наименьшее время занятости ВПП, выглядит так: Л Л Т С С Т. Эта последовательность обеспечивает  $1 + 1 + 2 + 1 + 1 + 1 = 7$  минут занятости ВПП. Оптимизация порядка вылета ВС в данном примере сокращает занятость ВПП более чем на 41 %.

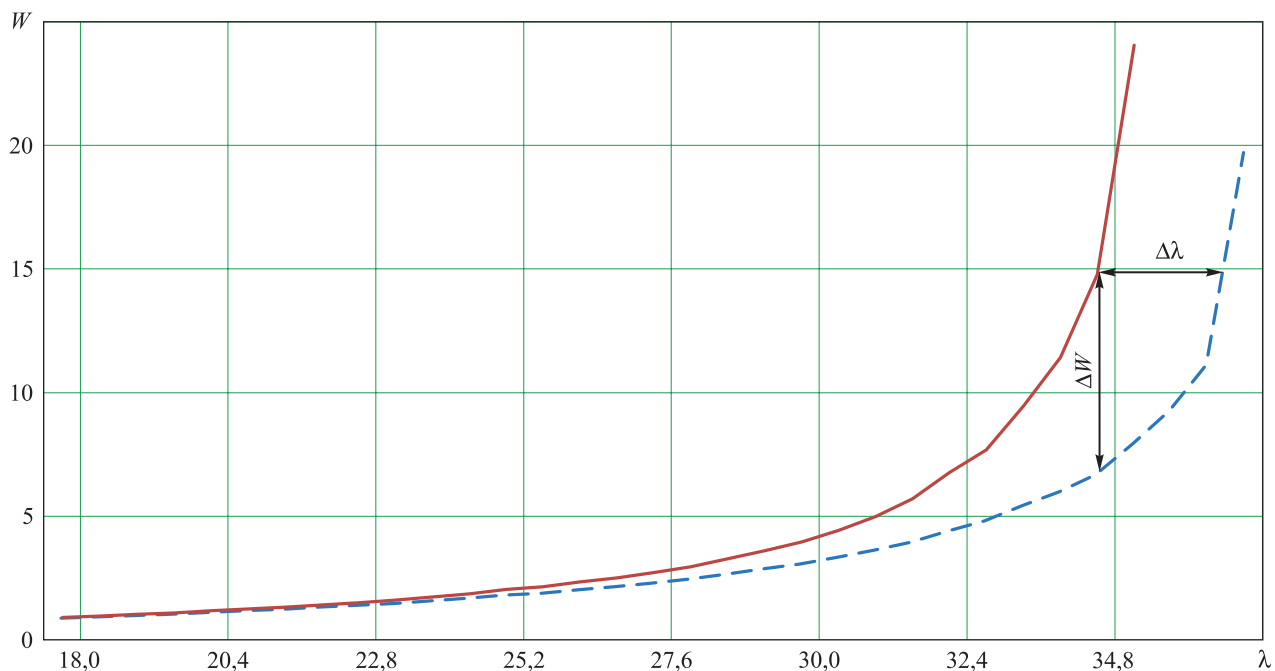
### Моделирование

*DMAN* представляет собой систему массового обслуживания  $M/G/1$ , на вход которой поступает пуассоновский поток заявленных по плану времени исполнительного старта ВС. Системы  $M/G/1$  подробно рассмотрены в работе [6]. Поток учитывал 3 весовые категории судов (легкие, средние и тяжелые) в соотношении 0,3, 0,4, 0,3, соответственно.

На рис. 2 показаны полученные путем моделирования зависимости средней задержки вылета от интенсивности потока вылетающих ВС. Величина  $\Delta\lambda$  показывает увеличение пропускной способности ВПП за счет минимизации времени занятия ВПП очередью задержанных ВС;  $\Delta W$  – на сколько снизилась средняя задержка вылетов ВС относительно максимально допустимой задержки. При интенсивности потока вылетов, вызывающей максимально допустимую среднюю задержку вылета в 15 мин  $\chi_\Sigma = 1,4$ .

### Заключение

Результаты моделирования показали возможность повышения пропускной способности ВПП на 6,3 % за счет упорядочивания очереди вылетающих ВС по интервалам вылета. Про-



**Рис. 2.** Зависимость средних значений времени задержки вылета от интенсивности вылетов для оптимизированной (— — —) и неоптимизированной (—) очередей

веден функциональный анализ *DMAN*. Показана целесообразность применения *DMAN* в наиболее загруженных аэропортах России.

#### Список литературы

1. Глобальный аэронавигационный план на 2016–2030 гг.: 5-е изд. Канада, Монреаль: Международная организация гражданской авиации, 2016. Doc 9750-AN/963.
2. Taylor A., Wilkinson T., Baseley D. Operational Requirements Document for EATMP Automated Support to ATS. Vol. 8. Departure Manager / EUROCONTROL. ASA.02.DMAN.DEL03. ORD, 1999.
3. Magill: Departure Manager Feasibility Report / EUROCONTROL. ASA.02.DMAN.DEL05. FEA, 1999.

4. Автоматизированные системы управления воздушным движением / А. Р. Бестугин, Ю. Г. Шатраков, М. А. Велькович и др. СПб.: Политехника, 2013. 450 с.

5. Приказ Минтранса РФ от 31 июля 2009 г. № 128 «Об утверждении Федеральных авиационных правил «Подготовка и выполнение полетов в гражданской авиации Российской Федерации» (с изменениями и дополнениями).
6. Соколов А. Н., Соколов Н. А. Однолинейные системы массового обслуживания. СПб.: Изд-во «Теледом» ГОУВПО СПбГУТ, 2010. 112 с.

Поступила 29.01.19

**Княжский Александр Юрьевич** – кандидат технических наук, научный сотрудник Акционерного общества «Ордена Трудового Красного Знамени Всероссийский научно-исследовательский институт радиоаппаратуры» (АО «ВНИИРА»), г. Санкт-Петербург.

Область научных интересов: обработка информации, управление воздушным движением.

**Плясовских Александр Петрович** – доктор технических наук, научный сотрудник Акционерного общества «Ордена Трудового Красного Знамени Всероссийский научно-исследовательский институт радиоаппаратуры» (АО «ВНИИРА»), г. Санкт-Петербург.

Область научных интересов: обработка информации, управление воздушным движением.



## **Increase of runway capacity using the Departure Manager**

The study proposes the operating principle of the electronic Departure Manager (DMAN). The principle forms recommendations to the dispatcher on streamlining the queue of delayed aircraft, which minimizes the runway occupancy time. The requirements for the manager and the possibility of its integration into the air traffic control system are determined. The simulation results showed the feasibility of introducing an electronic manager in the busiest airports and the possibility of increasing the capacity of the runway by more than 6 %.

*Keywords:* capacity, runway, efficiency, aircraft, optimization, departure.

**Кnyazhskiy Aleksandr Yurevich** – Candidate of Engineering Sciences, Research Fellow, Joint Stock Company “VNIIRA”, Saint Petersburg.

Science research interests: information processing, air traffic control.

**Plyasovskikh Aleksandr Petrovich** – Doctor of Engineering Sciences, Research Fellow, Joint Stock Company “VNIIRA”, Saint Petersburg.

Science research interests: information processing, air traffic control.