

УДК 681.396.36

ВРЕМЕННАЯ СОСТАВЛЯЮЩАЯ АНАЛИТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ДЕЙСТВИЙ ДИСПЕТЧЕРА УПРАВЛЕНИЯ ВОЗДУШНЫМ ДВИЖЕНИЕМ

О.А. КАПЦЕВИЧ, А.В. ДУБОВСКИЙ, Д.И. РАБЧЕНОК

Государственный военно-промышленный комитет Республики Беларусь,
ОАО «ВОЛАТАВТО», Республика Беларусь

Поступила в редакцию 13 февраля 2019

Аннотация. Рассмотрен математический аппарат, позволяющий находить временные характеристики действий диспетчера управления воздушным движением с интерфейсом автоматизированного рабочего места районного диспетчерского центра Единой системы организации воздушного движения Республики Беларусь.

Ключевые слова: управление воздушным движением, автоматизированное рабочее место, действия диспетчера.

Abstract. It has been considered the mathematical apparatus, allowing to find time characteristics of air traffic control dispatcher actions with the interface of an automated workplace of the regional dispatching centre of Uniform system of air movement organisation of Republic of Belarus.

Keywords: air traffic control, automated workplace, actions of the dispatcher.

Doklady BGUIR. 2019, Vol. 123, No. 5, pp. 79-86

The time component of analytical model of the air traffic control dispatcher actions

O.A. Kaptsевич, A.V. Dubovskiy, D.I. Rabchenok

DOI: <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2019-123-5-79-86>

Введение

Автоматизированные системы управления (АСУ) воздушным движением (ВД) Единой системы организации ВД Республики Беларусь относятся к эргатическим организационно-техническим системам реального масштаба времени, функционирующим в условиях неопределенности [1, 2]. Ключевую роль в данных системах играет диспетчер, реализующий функции управления ВД при помощи интерфейса автоматизированного рабочего места (АРМ) комплекса средств автоматизации (КСА). Проектирование и совершенствование интерфейсов АРМ для управления ВД является трудоемкой задачей по ряду причин:

– наличия большого числа неизвестных параметров, основная часть которых представляет собой взаимосвязанные величины, некоторые из них, к тому же, достаточно сложно формализуются;

– формирования объема информации, циркулирующей в АСУ ВД, исходя из необходимости обработки значительных массивов данных о воздушных судах (ВС), внешней среде и условиях организации ВД, причем в ограниченное время;

– оценки утомляемости диспетчера лишь косвенно, как правило, по частоте допускаемых им ошибок либо по продолжительности осуществления деятельности.

Используемый при разработке современных интерфейсов АРМ КСА управления ВД математический аппарат отличается наличием нерешенных вопросов формализации отдельных составляющих этапов переработки человеком-оператором информации. Кроме того,

в известных источниках информации [1, 3–7] отсутствуют прикладные методики построения и оценки эффективности интерфейсов указанных АРМ на основании априорных данных.

Таким образом, актуальной научно-практической задачей является разработка математической модели, предназначенной для анализа деятельности диспетчера на основании априорных данных с учетом его возможностей по переработке информации в ограниченное время и предъявления требований к интерфейсу АРМ КСА ВД. В рамках исследования должны затрагиваться аспекты, связанные с последовательностью и структурой диалога, «сценарием» и «действиями сторон», информационной емкостью средства отображения информации, расположением, характером и динамикой смены информации, перцептивными и моторными компонентами деятельности, влияющими на утомляемость диспетчера. Кроме того, необходимо снизить объем трудоемких экспериментальных исследований, связанных с многовариантностью деятельности диспетчера.

Оценка возможностей диспетчера по обработке поступающей информации

Для оценки пропускной способности диспетчера используется скорость обработки им информации в единицу времени, равную периоду обновления информации на экране монитора воздушного движения. Обработка информации заключается в выполнении определенной последовательности действий, как реакции на появление события (признака изменения состояния системы, отслеживаемого диспетчером).

В процессе обработки события, наступившего в системе управления, и в зависимости от характера этого события диспетчер действует по определенному алгоритму. Скорость выполнения алгоритма отождествляется со средней скоростью переработки диспетчером информации с целью устранения энтропии в системе управления и определяется выражением

$$V = \frac{1}{\tau} \cdot \sum_{i=1}^{m_{\text{л}}} I_i, \text{ где } I_i - \text{ количество информации, необходимой для анализа } i\text{-го логического}$$

условия; $m_{\text{л}}$ – общее число логических условий в алгоритме; τ – время выполнения алгоритма.

Таким образом, среднюю скорость переработки диспетчером информации можно представить величиной, обратно пропорциональной времени выполнения алгоритма

диспетчером. Величину $\sum_{i=1}^m I_i$ целесообразно находить методом построения дерева

событий [4], который позволяет определять количество информации, содержащееся в сложных событиях, характеризующих изменение состояния системы.

К основным этапам решения задачи переработки информации диспетчером относятся: оценка обстановки (уяснение задачи); принятие решения; исполнение решения; контроль исполнения и коррекция решения (при необходимости).

Этап уяснения задачи диспетчером состоит из обнаружения им факта наступления события в системе при помощи анализа визуальной информации и идентификации наступившего события. Время, затрачиваемое диспетчером на данном этапе (время восприятия

информации), определяется следующим соотношением [5]: $\tau_{\text{в}} = a + b \cdot \sum_{i=1}^{m_{\text{л}}} I_i$, где a –

константа, связанная со временем простой реакции диспетчера; b – константа, сопоставляемая с величиной, обратно пропорциональной скорости передачи информации. Константы находятся экспериментально или используются усредненные значения.

Этап принятия решения заключается в переработке диспетчером информации по выбору соответствующего набора действий как реакции на появление события. Временной отрезок для принятия соответствующего решения, определяется выражением [6]

$$\tau_{\text{р}} = a + \frac{I_{\text{з}}}{V_{\text{з}}} + \frac{I_{\text{в}}}{V_{\text{в}}} + \frac{I_{\text{л}}}{V_{\text{л}}}, \text{ где } I_{\text{з}}, I_{\text{в}} \text{ и } I_{\text{л}} - \text{ количество информации для запоминания,}$$

вычислений и проверки логических условий; $V_{\text{з}}, V_{\text{в}} \text{ и } V_{\text{л}}$ – скорости соответственно.

Если диспетчер должен запомнить m символов (знаков, сигналов) в порядке их поступления из общего количества символов K , то $I_{31} = m \cdot \log_2 K$ (при равновероятном поступлении сигналов) [6]. Если же диспетчеру не нужно запоминать порядок поступления сигналов, а только помнить сами сигналы, то количество информации для запоминания при равновероятном поступлении сигналов определяется выражением [6]

$$I_{32} = \log_2 \frac{K!}{m!(K-m)!}.$$

Количество информации, используемое при простейших вычислительных операциях (сложении, умножении, делении), находится по формуле [6] $I_B = \sum_{i=1}^v \log_2 N_i + \log_2 L$, где

v – общее количество чисел, используемых для получения результата; N_i – максимально возможные значения используемых при вычислении чисел; L – максимально возможное значение результата вычисления.

Информация, необходимая для проверки логических условий [6]: $I_{л} = \sum_{i=1}^s \log_2 n_i$, где

s – общее количество проверяемых логических условий; n_i – количество возможных альтернатив (исходов), возникающих при проверке i -го условия.

Величины V_3 , V_B и $V_{л}$ зависят от степени совмещения стимула и реакции на него, тренированности диспетчера, его состояния и т. д. Находятся экспериментально или используются среднестатистические значения [6].

Этап исполнения решения разделяется на поиск необходимого объекта управления (ОУ) и воздействие на него. Поиск связан с реализацией диспетчером определенной стратегии поиска в информационном поле. Необходимое для этого диспетчеру

время находится из выражения: $\tau_{п} = \sum_{i=1}^{l_{\text{поиска}}} (\tau_{\text{пер}i} + \tau_{\text{ф}i})$, где $l_{\text{поиска}}$ – число шагов поиска

(число фиксаций взора, затраченное на нахождение объекта); $\tau_{\text{пер}i}$ – время i -го перемещения взора; $\tau_{\text{ф}i}$ – время i -й фиксации взора.

Время перемещения взора определяется углом скачка взора, а время фиксации зависит от свойств информационного поля, способа деятельности, степени сложности элементов. В условиях высокой однородности элементов и известной задачи $\tau_{\text{ф}i} \gg \tau_{\text{пер}i}$. Тогда выражение для величины времени поиска необходимого ОУ: $\tau_{п} \approx n_{\text{поиска}} \cdot \overline{\tau_{\text{ф}}}$, где $n_{\text{поиска}}$ – математическое ожидание количества шагов поиска; $\overline{\tau_{\text{ф}}}$ – средняя продолжительность фиксации взора диспетчера на контролируемом параметре.

Величина $n_{\text{поиска}}$ определяется путем анализа варианта информационной модели (ИМ), отображаемой на АРМ (содержит информацию о состоянии объектов воздействия, внешней среде и способах управления), и использования следующего соотношения [3]:

$$n_{\text{поиска}} = \left(\frac{N}{Z} + 1 \right) / (M + 1), \quad \text{где } N - \text{ число элементов информационного поля;}$$

M – количество ОУ, обладающих заданным для поиска признаком; Z – объем зрительного восприятия.

Под объемом зрительного восприятия считается то количество компонентов ИМ, которое одновременно попадает в зону, ограниченную углом зрения диспетчера шириной

по 10° в горизонтальной и вертикальной плоскостях матрицы средства отображения информации. Для определения значений $\overline{\tau}_\phi$, используются статистические значения [5, 6].

Воздействие на ОУ связано с осуществлением диспетчером моторных функций с целью реализации решения, принятого на предыдущем этапе. Время, необходимое для этого, находится при помощи модели KLM (от англ. Keystroke, Level, Model – Нажатие на клавишу, Уровень, Модель), использующей закон Фитса [7]. Данная модель позволяет в небольшой промежуток времени и с необходимой для целей настоящего исследования эффективностью оценить время выполнения диспетчером моторных действий. В KLM специфицируются действия диспетчера на элементарном уровне, как физическом – нажатие клавиши, перемещение указателя графического манипулятора, так и ментальном, например, выборки из памяти названий команд. Каждое действие, неделимое на более простые действия и называемое в контексте модели элементарным оператором действия (ЭОД), ассоциировано с определенным временным значением, являющимся табличной величиной [3, 7]. Суммируя временные значения для всех ЭОД в модели, можно получить априорную оценку времени выполнения задачи диспетчером на выбранном варианте интерфейса.

Формально KLM описывается следующим выражением [3]: $G_i = \{M_l, S_l\}$, где G_i – цель, которую диспетчер преследует в ходе осуществления действий с интерфейсом ($i = \overline{1, \Delta}$, Δ – общее количество целей); M_l – метод достижения i -й цели; S_l – критерий выбора l -го метода достижения цели ($l = \overline{1, \Theta}$, Θ – общее количество методов и критериев их выбора). Метод достижения цели M_l определяет упорядоченный набор ЭОД $M_l = (d_1, d_2, \dots, d_j)$, где $j = \overline{1, S}$, S – общее количество ЭОД в рамках реализации l -го метода. Каждому ЭОД d_j соответствует определенное время t_j , в течение которого диспетчер выполняет данный ЭОД.

Использование KLM для достижения цели G_i заключается в выборе одного из методов M_l в соответствии с заранее определенным критерием S_l и определении последовательности ЭОД d_j . Затем для последовательности ЭОД производится расчет суммарного времени реализации: $T(M_l) = \sum_{j=1}^S t_j$. Откуда время, необходимое диспетчеру для воздействия на ОУ, определяется соотношением $\tau_m = T(M_l)$.

Исходя из предположения, что этап контроля при решении задачи переработки информации диспетчером функционально осуществляет машина, время реакции диспетчера на событие определяется как

$$\tau_{\text{рк}} = \tau_{\text{в}} + \tau_{\text{р}} + \tau_{\text{п}} + \tau_{\text{м}}, \quad (1)$$

где $\tau_{\text{в}}$ – время восприятия сигнала; $\tau_{\text{р}}$ – время принятия решения; $\tau_{\text{п}}$ – время поиска ОУ; $\tau_{\text{м}}$ – время осуществления моторного акта.

Уменьшение величины $\tau_{\text{рк}}$ приводит к увеличению скорости переработки информации и повышению пропускной способности диспетчера как компонента человек-машинной системы массового обслуживания. Следующим выражением задается требование к пропускной способности системы человек-машина: $\tau_{\text{рк}} \leq \tau_{\text{рк.треб}} - \sum_{i=1}^n \tau_{\text{м}_i}$, где $\tau_{\text{рк.треб}}$ – требуемое время переработки информации диспетчером; $\tau_{\text{м}_i}$ – время задержки информации в i -м звене машины; n – общее количество машинных звеньев.

Временной компонент аналитической модели (АМ) действий диспетчера с интерфейсом АРМ можно представить в виде, изображенном на рис. 1. На рисунке использованы следующие обозначения: $\tau_{\text{рк.треб.}}$ – требуемое время обработки информации;

$\sum_{i=1}^n \tau_{\text{м}_i}$ – время задержки информации в звеньях машины; $\sum_{i=1}^m I_i$ – количество анализируемой информации; K – общее количества символов (знаков, сигналов); n_i – количество возможных альтернатив при проверке условия; v – количество чисел, используемых для получения результата; m – количество символов (знаков, сигналов) для запоминания; N_i – максимальные значения используемых при вычислении чисел; R – максимально возможное значение результата вычисления; S – количество проверяемых логических условий; M – число объектов, обладающих признаком поиска; Z – объем зрительного восприятия; N – количество элементов информационного поля; d_j – моторные действия.

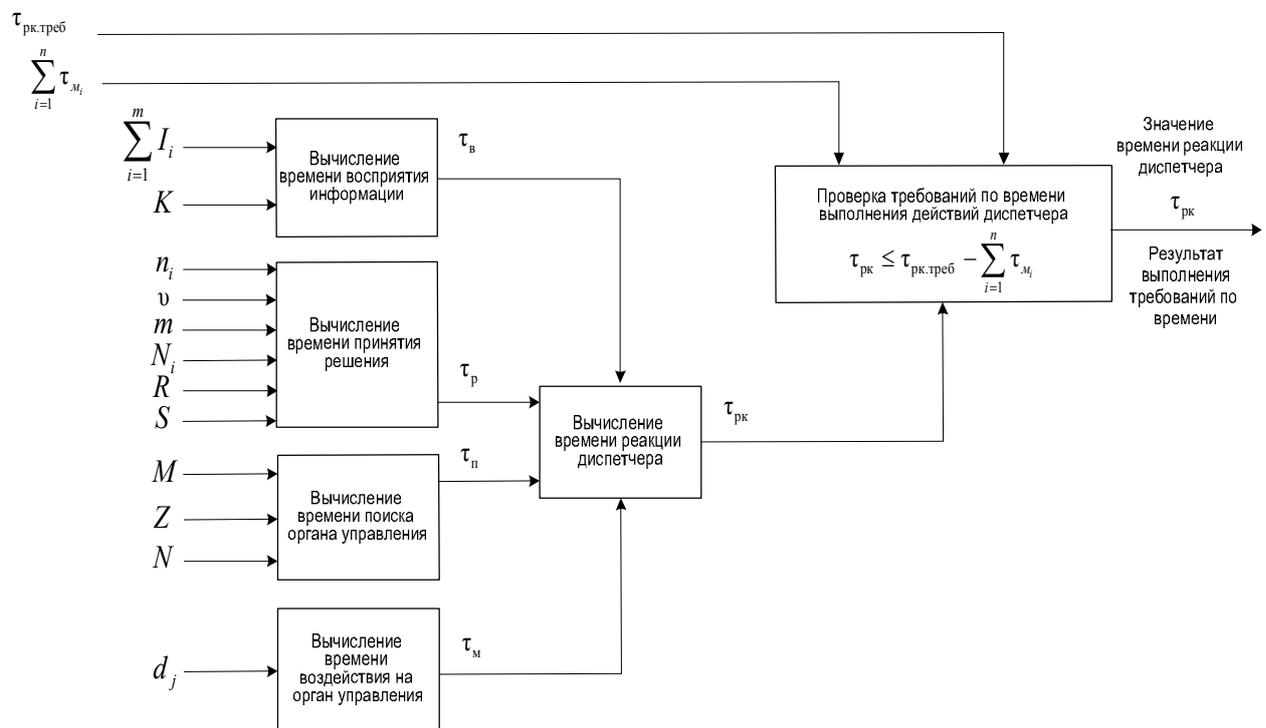


Рис. 1. Структура временного компонента аналитической модели действий диспетчера с интерфейсом

Блоки для вычисления времени восприятия информации, принятия решения, поиска ОУ и воздействия на него, изображенные на рисунке 1, предназначены для обработки массивов исходных данных, формируемых на основании анализа ИМ. Информация с выходов перечисленных блоков поступает в блок вычисления времени реакции диспетчера, который определяет время, затрачиваемое на обработку одного события в системе управления. Указанное время используется в блоке проверки требований по времени выполнения действий диспетчера, предназначенном для проверки временного критерия деятельности в ИМ. В этот же блок поступают данные о требуемом времени обработки информации и времени задержки информации в звеньях машины, формируемые на основании анализа условий использования ИМ и соответствующей аппаратной части.

Таким образом, определена временная составляющая АМ, состоящая из математических выражений, позволяющих формализовать основные этапы переработки информации человеком-оператором, оценить скорость деятельности и предъявить требования к его пропускной способности как диспетчера, реализующего управленческие функции в АСУ ВД Единой системы организации ВД при современном уровне интенсивности полетов.

Экспериментальные исследования

Для проверки адекватности предлагаемой АМ были использованы динамические прототипы фрагмента ИМ обстановки [8], которые позволили имитировать деятельность диспетчера при высоком уровне интенсивности ВД. Проводилось полунатурное моделирование и оценивалась близость теоретических результатов практической реализации.

Для проведения эксперимента были отобраны испытуемые из предметно-ориентированной группы специалистов в количестве 10 человек [9]. Сущность моделируемого процесса состояла в последовательном выполнении испытуемым необходимых действий с ИМ в зависимости от предъявляемых условий, связанных с ОУ и внешней средой. После выдачи испытуемому команды на выполнение определенного действия он находил необходимую информацию на экране, принимал решение, производил поиск ОУ и воздействовал на него. Использовалось 17 наиболее вероятных действий, представленных в нескольких смысловых наборах. Характеристики состояний процесса являлись детерминированными, а параметры случайными. В результате моделирования определялись временные характеристики выполнения действий диспетчером. В качестве частного параметра моделирования использовалась величина τ_{pk} (1). Количество экспериментов по каждому действию составило 30, общее количество экспериментов – 510. Указанное количество позволило теоретически провести оценку параметра τ_{pk} с доверительной вероятностью, равной 0,95, и относительной погрешностью 10 % [10]. Результаты эксперимента в виде значений времени выполнения действий фиксировались вручную на бумажном носителе информации.

Анализ результатов

На рис. 2 представлены гистограммы, построенные с использованием экспериментальных и расчетных значений временных отрезков выполнения диспетчером необходимых действий.

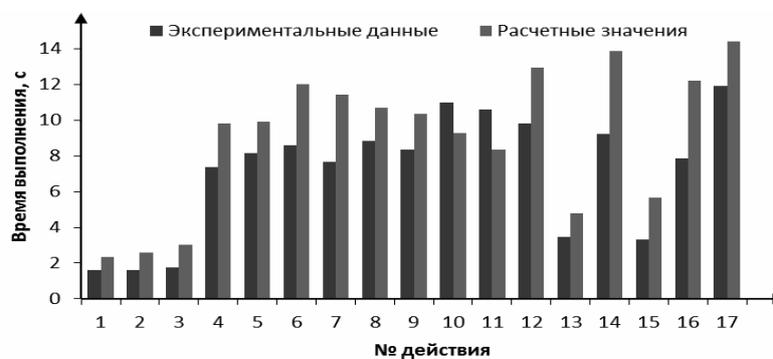


Рис. 2. Экспериментальные данные и расчетные значения времени выполнения

Черным цветом обозначены столбцы, характеризующие эмпирическую оценку значений времени выполнения диспетчером различных действий, серым – расчетные данные. Анализ гистограмм и сравнение средних арифметических для множеств значений двух выборок (7,98 и 9,03 с соответственно) в целом подтвердили адекватность предлагаемой АМ. Определенные различия объясняются особенностями условий эксперимента, а именно тем, что не все действия испытуемых характеризовались максимально неблагоприятными условиями для их реализации. В свою очередь, расчетные значения были определены для наиболее неблагоприятных условий.

В результате анализа временных характеристик деятельности испытуемых было установлено следующее. Для уменьшения значения величины времени восприятия событий необходимо повысить заметность событий и улучшить соответствие пар «стимул-реакция». Для уменьшения τ_p (1) необходимо сократить количество условных обозначений, упростить логическую и математическую обработку данных, уменьшить порядок

обрабатываемых диспетчером чисел и разделить когнитивные блоки информации паузами, сопровождающимся отсутствием событий в ИМ. Для уменьшения τ_{Π} (1) необходимо: формировать объем зрительного восприятия исходя из условия того, что в зоне ясной видимости диспетчера должно быть не менее шести целевых анализируемых элементов ИМ одновременно; в качестве условных обозначений использовать простейшие геометрические фигуры. Для уменьшения $\tau_{\text{м}}$ (1) необходимо уменьшить количество ЭОД, увеличить линейные размеры целевых элементов до значений, ограниченных объемом зрительного восприятия, и уменьшить дистанции до целевых позиций элементов однородных задач.

Заключение

Скорость переработки информации диспетчером является одним из основополагающих критериев при разработке ИМ динамично-меняющейся обстановки. Разработчик должен обеспечить не просто высокую, а гарантированную скорость переработки. Предлагаемая временная составляющая АМ адекватна и позволяет на основании априорных данных с погрешностью менее 15 % численно анализировать действия диспетчера с учетом цикла управления и определенного варианта построения ИМ и предъявлять требования к его пропускной способности. Использование априорной информации позволяет значительно снизить объем трудоемких экспериментальных исследований. Учитывается степень загруженности диспетчера и его возможности по эффективной реализации своих функций. Используются существующие аналитические выражения для формализации взаимодействия человека-оператора с интерфейсом АРМ.

Использование предлагаемой временной составляющей АМ действий диспетчера с интерфейсом повысит эффективность проектируемых эргатических систем в ситуациях, связанных с высокой нагрузкой человека-оператора. Например, на АРМ диспетчеров Единой системы организации ВД.

Список литературы

1. Авиационные правила «Методика определения пропускной способности органов диспетчерского обслуживания воздушного движения» : утв. М-вом транспорта и коммуникаций Респ. Беларусь 31.03.2008. Минск, 2008. 15 с.
2. Европейская организация по безопасности аэронавигации (Евроконтроль). Общий обзор [Электронный ресурс]. URL: http://www.dspk.cs.gkovd.ru/library/data/evrokontrol_obschiy_obzor.pdf (дата обращения: 02.07.2018).
3. Раскин Д. Интерфейс: новые направления в проектировании компьютерных систем. СПб.: Символ-Плюс, 2004. 272 с.
4. Галактионов А.И. Представление информации оператору (исследование деятельности человека-оператора производственных процессов). М.: Энергия, 1969. 139 с.
5. Шупейко И.Г. Теория и практика инженерно-психологического проектирования и экспертизы : учеб.-метод. пособие. Минск : БГУИР, 2010. 120 с.
6. Голубев Б.Л. Основы эргономики. М.: РОАТ, 2009. 20 с.
7. Абдулин Е.Р. Метод построения и проверки гипотез о поведении пользователя в человеко-машинном взаимодействии // Управление большими системами. 2010. № 30. С. 104–127.
8. Рабченко Д.И. Методика синтеза информационной модели на командном пункте войск противовоздушной обороны // Информатика. 2017. № 1. С. 78–91.
9. Булойчик В.М. Военно-прикладные вопросы математического моделирования. Математические методы, используемые при разработке моделей для принятия решения. Минск: Воен. акад. Респ. Беларусь, 2000. 179 с.
10. ОТГ 1.2.10-2014 Системы и комплексы (образцы) вооружения и военной техники. Общие требования к методам государственных испытаний. Минск, 2014. 40 с.

References

1. Aviacionnye pravila «Metodika opredelenija propuskoj sposobnosti organov dispetcherskogo obsluzhivaniya vozdushnogo dvizhenija» : utv. M-vom transporta i kommunikacij Resp. Belarus' 31.03.2008. Minsk, 2008. 15 s. (in Russ.)

2. Evropejskaja organizacija po bezopasnosti ajeronavigacii (Evrokontrol'). Obshhij obzor [Electronic resource]. URL: http://www.dspk.cs.gkovd.ru/library/data/evrokontrol_obschiy_obzor.pdf (date of access: 02.07.2018). (in Russ.)
3. Raskin D. Interfejs: novye napravlenija v proektirovanii komp'juternyh sistem. SPb.: Simvol-Pljus, 2004. 272 s. (in Russ.)
4. Galaktionov A.I. Predstavlenie informacii operatoru (issledovanie dejatel'nosti cheloveka-operatora proizvodstvennyh processov). M. : Jenergija, 1969. 139 s. (in Russ.)
5. Shupejko I.G. Teorija i praktika inzhenerno-psihologicheskogo proektirovanija i jekspertizy : ucheb.-metod. posobie. Minsk : BGUIR, 2010. 120 s. (in Russ.)
6. Golubev B.L. Osnovy jergonomiki. M.: ROAT, 2009. 20 s. (in Russ.)
7. Abdulin E.R. Metod postroenija i proverki gipotez o povedenii pol'zovatelja v cheloveko-mashinnom vzaimodejstvii // Upravlenie bol'shimi sistemami. 2010. № 30. S. 104–127. (in Russ.)
8. Rabchenok D.I. Metodika sinteza informacionnoj modeli na komandnom punkte vojsk protivovozdushnoj oborony // Informatika. 2017. № 1. S. 78–91. (in Russ.)
9. Bulojchik V.M. Voenno-prikladnye voprosy matematicheskogo modelirovanija. Matematicheskie metody, ispol'zuemye pri razrabotke modelej dlja prinjatija reshenija. Minsk: Voen. akad. Resp. Belarus', 2000. 179 s. (in Russ.)
10. OTT 1.2.10-2014 Sistemy i kompleksy (obrazcy) vooruzhenija i voennoj tehniki. Obshhie trebovanija k metodam gosudarstvennyh ispytanij. Minsk, 2014. 40 s. (in Russ.)

Сведения об авторах

Капцевич О.А., к.т.н, ведущий научный сотрудник ОАО «Агат – системы управления» – управляющая компания холдинга «Геоинформационные системы управления».

Дубовский А.В., заведующий кафедрой организации движения и обеспечения безопасности на воздушном транспорте Белорусской государственной академии авиации.

Рабченко Д.И., ведущий инженер ОАО «ВОЛАТАВТО».

Information about the authors

Kaptsevich O.A., PhD, leading researcher of Open OJSC «Agate – control systems» – the operating company of holding «Geoinformation control systems».

Dubovsky A.B, head of the department of movement organisation and safety maintenance on air transport of Belarus state academy of aircraft.

Rabchenok D.I, leading engineer of OJSC «VOLATAUTO».

Адрес для корреспонденции

220013, Республика Беларусь,
г. Минск, ул. Кульман, 2-1, пом. 1-143,
ОАО «ВОЛАТАВТО»
тел. +375-29-399-46-62;
e-mail: dimedrolus1798@tut.by
Рабченко Дмитрий Иванович

Address for correspondence

220013, Republic of Belarus,
Minsk, Kulman st., 2-1, pr.1-143
OJSC «VOLATAVTO»
tel. +375-29-399-46-62;
e-mail: dimedrolus1798@tut.by
Rabchenok Dmitry Ivanovich