

БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

Объект авторского права
УДК 656.7.085.7

РАБЧЕНОК
Дмитрий Иванович

**СИНТЕЗ ИНФОРМАЦИОННОЙ МОДЕЛИ
ДЛЯ ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ
ПРИ УПРАВЛЕНИИ ВОЗДУШНЫМ ДВИЖЕНИЕМ**

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук
по специальности 05.13.01 – системный анализ,
управление и обработка информации

Минск 2025

Научная работа выполнена в учреждении образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники» и в учреждении образования «Военная академия Республики Беларусь»

Научный руководитель – **Капцевич Олег Александрович**,
кандидат технических наук,
заместитель директора по научной работе
общества с ограниченной ответственностью
«ИнноТех Солюшнс»

Официальные оппоненты: **Лобатый Александр Александрович**,
доктор технических наук, профессор,
профессор кафедры «Робототехнические
системы» Белорусского национального
технического университета

Слижиков Юрий Сергеевич,
кандидат военных наук, доцент,
доцент кафедры летной подготовки и
боевого применения авиации
учреждения образования
«Военная академия Республики Беларусь»

Оппонирующая организация – Государственное научное учреждение
«Объединенный институт проблем информатики
Национальной академии наук Беларуси»

Защита состоится 20 февраля 2025 года в 14.30 часов на заседании совета по защите диссертаций Д 02.01.02 при Белорусском государственном университете по адресу: 220030, г. Минск, ул. Ленинградская 8, корпус юридического факультета, ауд. 407.

Телефон ученого секретаря: 209 57 09; e-mail: Kochyn@bsu.by.

С диссертацией можно ознакомиться в Фундаментальной библиотеке Белорусского государственного университета.

Автореферат разослан «20» января 2025 года.

Ученый секретарь
совета по защите диссертаций Д 02.01.02,
кандидат технических наук, доцент



В.П.Кочин

ВВЕДЕНИЕ

Учитывая важность воздушного транспорта и его существенное влияние на развитие Республики Беларусь, задача модернизации системы организации воздушного движения для ее соответствия современным условиям является одной из приоритетных. Согласно прогнозам ведущих авиаперевозчиков, к 2025 году в мировом масштабе ожидается увеличение интенсивности воздушного движения примерно в 2–3 раза. По данным Международной организации гражданской авиации, каждые три из четырех авиационных происшествий происходят по причинам, обусловленным ошибками лица, принимающего решение (ЛПР).

Автоматизированная система управления воздушным движением (АСУВД) содержит разнородные элементы, предназначенные для решения задач обработки значительных информационных потоков. Одним из таких элементов является комплекс средств автоматизации (КСА), в котором представлена информация о состоянии объектов воздействия, внешней среде и способах управления. Данную информацию объединяет информационная модель (ИМ) для поддержки принятия решений.

В современных условиях задача формирования ИМ для поддержки принятия решений, соответствующей функциям и возможностям ЛПР, а также обеспечивающей информационный баланс представляемой ему информации исходя из требований минимизации величины затрат на функционирование ИМ, является достаточно сложной. Основные причины этого — трудоемкие экспериментальные исследования деятельности ЛПР при управлении воздушным движением и отсутствие соответствующего показателя качества деятельности ЛПР, инвариантного (соответствующего) поставленным задачам.

В проанализированных источниках информации отсутствуют методики разработки ИМ для поддержки принятия решений. Существующие способы, алгоритмы и рекомендации, используемые при построении и оценке фрагментов ИМ специального назначения, ИМ для отраслей народного хозяйства, производственных и технологических процессов, позволяют с необходимым качеством разрабатывать лишь отдельные составляющие ИМ для поддержки принятия решений в АСУВД, касающиеся определенных условий деятельности ЛПР.

Таким образом, необходимо разработать методический аппарат проектирования и оценки ИМ для поддержки принятия решений в АСУВД районного диспетчерского центра (РДЦ), позволяющий снизить объем экспериментальных исследований, а также проводить оценку параметров ИМ на основании априорных данных.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Связь работы с научными программами (проектами), темами.

Тема диссертационного исследования соответствует пункту № 1 Перечня приоритетных направлений научной, научно-технической и инновационной деятельности на 2021–2025 годы, утвержденного указом Президента Республики Беларусь от 07.05.2020 № 156.

Результаты диссертации использовались при проведении следующих научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ:

1. «Обоснование облика элементов системы вооружения с учетом особенностей сетцентрических подходов к военным действиям» (шифр «Система»), выполненной в соответствии с Государственной программой научных исследований Республики Беларусь на 2011–2015 годы.

2. «Разработка общих технических требований по эргономике и технической эстетике систем и комплексов (образцов) вооружения и военной техники» (шифр «ДОТ 9/6/04»), выполненной в соответствии с Планом научной работы Вооруженных Сил Республики Беларусь на 2014 год.

3. «Разработка общих технических требований к средствам отображения информации военного назначения» (шифр «ДОТ 24/03»), выполненной в соответствии с Планом научной работы Вооруженных Сил Республики Беларусь на 2014 год.

4. «Разработка общих требований к методам контроля эргономических характеристик, обитаемости и технической эстетики систем и комплексов (образцов) вооружения и военной техники» (шифр «ДОТ 9/6/10»), выполненной в соответствии с Планом научной работы Вооруженных Сил Республики Беларусь на 2015 год.

5. «Разработка общих технических требований к общим эргономическим требованиям» (шифр «Комфорт») в интересах Командования военно-воздушными силами и войсками противовоздушной обороны Вооруженных Сил Республики Беларусь на 2017 год.

6. «Разработка проекта программ и методик предварительных испытаний опытных образцов 82-мм и 120-мм минометов» (шифр «Лотос-ПМ»), выполненной в 2017 году по заданию производственно-торгового частного унитарного предприятия «Минотор-Сервис» в интересах управления ракетных войск и артиллерии Генерального штаба Вооруженных Сил Республики Беларусь.

Цель, задачи, объект и предмет исследования. *Целью исследования является повышение эффективности взаимодействия ЛПР с КСА РДЦ при выполнении функций по руководству потоками ВС за счет использования усовершенствованной ИМ для поддержки принятия решений.*

Задачами исследования являются:

1. Анализ ИМ для поддержки принятия решений в АСУВД и методов

их построения с учетом особенностей руководства потоками ВС в условиях увеличения интенсивности воздушного движения.

2. Разработка аналитической модели (АМ) взаимодействия ЛПР с КСА с учетом пропускной способности ЛПР и точности его деятельности.

3. Разработка алгоритма структурно-параметрического синтеза ИМ для поддержки принятия решений в АСУВД, использование которого позволяет создать эффективную ИМ.

4. Синтез ИМ для поддержки принятия решений, проверка адекватности и эффективности.

Объект исследования – ИМ для поддержки принятия решений в АСУВД.

Предмет исследования – научно-методический аппарат формирования ИМ для поддержки принятия решений.

Научная новизна

1. Выявлены факторы деятельности ЛПР в АСУ специального назначения, оказывающие существенное влияние на качество его взаимодействия с КСА в современных условиях дефицита времени и высокой стоимости ошибки и не учитываемые ранее при разработке ИМ для поддержки принятия решений в АСУВД.

2. Разработана АМ взаимодействия ЛПР с КСА, позволяющая решать двухкритериальную задачу оценки эффективности ИМ для поддержки принятия решений по временной и точностной составляющим.

3. Разработан алгоритм структурно-параметрического синтеза ИМ для поддержки принятия решений в АСУВД, использование которого позволяет сформировать ИМ со структурой и параметрами, повышающими эффективность взаимодействия ЛПР с КСА.

Положения, выносимые на защиту:

1. Многофакторный показатель качества деятельности ЛПР, отличающийся инвариантностью к назначению, целям, решаемым задачам и сложности системы управления, позволяющий решать двухкритериальную задачу оценки эффективности ИМ для поддержки принятия решений по временной и точностной составляющим, а также наглядно характеризовать эффективность ИМ.

2. Аналитическая модель взаимодействия ЛПР с КСА, отличающаяся учетом структурных особенностей системы управления, точности реализации и временных характеристик режима управления, позволяющая проводить численную оценку эффективности представления информации, а также предъявлять требования к ИМ для поддержки принятия решений по безошибочности и оперативности деятельности ЛПР.

3. Алгоритм структурно-параметрического синтеза ИМ для поддержки принятия решений в АСУВД, отличающийся использованием метода построения дерева событий при формировании структуры ИМ, АМ взаимодействия ЛПР с КСА, а также многофакторного показателя качества деятельности ЛПР, что позволяет в результате использования алгоритма повысить эффективность

взаимодействия ЛПР с КСА по времени выполнения действий ЛПР не менее чем на 16 %, по точности выполнения действий ЛПР — не менее чем на 49 %, с доверительной вероятностью 0,95 и относительной погрешностью 10 %, а также по усредненной по определенному набору действий вероятности безошибочной деятельности ЛПР с 0,056 до 0,232 (для типовых условий).

Личный вклад соискателя ученой степени. Соискателем лично получены следующие научные результаты:

- проведен анализ деятельности ЛПР в АСУВД специального назначения, выявлены факторы, влияющие на качество его взаимодействия с КСА в современных условиях дефицита времени и высокой стоимости ошибки;
- разработан многофакторный показатель качества деятельности ЛПР;
- разработана АМ взаимодействия ЛПР с КСА;
- разработан алгоритм структурно-параметрического синтеза ИМ для поддержки принятия решений в АСУВД.

Совместно с научным руководителем была определена иерархическая структура и обоснован метод оценки эффективности ИМ для поддержки принятия решений в АСУВД.

Апробация результатов диссертации. Основные результаты исследований по теме диссертации доложены и обсуждены на международной военно-научной конференции «Актуальные аспекты инновационного развития Вооруженных Сил с учетом характера войн будущего» (Минск, 2011); международной военно-научной конференции «Современная военно-техническая политика: проблемы и перспективы» (Минск, 2013); V ежегодном научно-практическом семинаре по связи «Применение современных информационных технологий с учетом особенностей сетцентрических подходов к военным действиям» (Минск, 2014); XVII Республиканской научной конференции студентов и аспирантов (Гомель, 2014); международной научной конференции «Информационные технологии и системы» (Минск, 2014); международной военно-научной конференции «Обеспечение военной безопасности государства: проблемы и перспективы» (Минск, 2017); III Международной заочной научно-практической конференции «Авиация: история, современность, перспективы развития» (Минск, 2018); VIII Международной научной конференции по военно-техническим проблемам, проблемам обороны и безопасности, использованию технологий двойного применения (Минск, 2019); V Международной научно-практической конференции «Авиация: история, современность, перспективы развития» (Минск, 2020).

Опубликованность результатов диссертации. Результаты диссертации опубликованы в 19 научных работах, из них: 7 статей в научных журналах, соответствующих пункту 19 Положения о присуждении ученых степеней и присвоении ученых званий (общим объемом 3,6 авторского листа); 2 статьи в других рецензируемых научных изданиях; 4 статьи в сборниках материалов научных конференций; 5 тезисов докладов; 1 патент.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из перечня сокращений и обозначений, введения, общей характеристики работы, четырех глав, заключения, списка использованных источников и приложений. Полный объем диссертации составляет 188 страниц, в том числе: 43 рисунка, 22 таблицы 78 формул на 51 странице; 8 приложений на 35 страницах. Список использованных источников из 102 наименований на 9 страницах, из них список публикаций соискателя из 19 наименований на 3 страницах.

ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

В первой главе диссертации, основные положения которой опубликованы в [1–А; 2–А; 3–А; 8–А], проведен анализ ИМ для поддержки принятия решений в современных АСУВД, подходов и методов построения, критериев их оценки [14–А; 15–А]. Определено, что наличие многоуровневой структуры ИМ и использование режимов представления информации не позволяют эффективно решать задачи управления в условиях высокой динамики изменения внешней среды, свойственных современному воздушному движению [12–А].

В математическом аппарате, применяемом для анализа взаимодействия ЛПР с КСА, используются преимущественно вероятностные методы, что не позволяет проводить анализ и предъявлять требования к своевременности и точности деятельности ЛПР априорно, так как предполагает использование статистического материала. В проанализированных источниках информации отсутствуют статистические данные, характеризующие этапы переработки информации ЛПР в критическом и аварийном режимах его деятельности.

В рамках моделирования работы АСУВД с целью оценки ИМ для поддержки принятия решений целесообразно использовать многофакторный показатель качества деятельности ЛПР η^* , описываемый выражением [5–А; 7–А; 11–А]:

$$\eta^* = K_{\text{точн}} \cdot \frac{\eta_{\text{точн.1}} - \eta_{\text{точн.2}}}{\eta_{\text{точн.1}}} + K_{\text{врем}} \cdot \frac{\eta_{\text{врем.1}} - \eta_{\text{врем.2}}}{\eta_{\text{врем.1}}}, \quad (1)$$

где $K_{\text{точн}}$ и $K_{\text{врем}}$ – весовые коэффициенты, соответствующие точностному и временному показателям эффективности (их сумма не превышает единицы); $\eta_{\text{точн.1}}$ и $\eta_{\text{точн.2}}$ – частные точностные показатели эффективности существующей и синтезируемой ИМ соответственно; $\eta_{\text{врем.1}}$ и $\eta_{\text{врем.2}}$ – частные временные показатели эффективности существующей и синтезируемой ИМ соответственно.

Таким образом, для построения ИМ в АСУВД необходимо разработать научно-методический аппарат, позволяющий априорно анализировать существенные аспекты деятельности ЛРП и предъявлять требования к своевременности и точности его действий, а также к структуре системы

управления. Необходимо разработать алгоритм, позволяющий проектировать ИМ, учитывающий критические ситуации в системе управления и реализующий целесообразные для деятельности ЛПР вспомогательные действия со стороны КСА.

Во *второй главе* диссертации, основные положения которой опубликованы в [4–А; 5–А; 6–А; 9–А], усовершенствован математический аппарат, описывающий взаимодействие ЛПР с КСА, представляющий собой АМ, формализующую временную и точностную компоненты деятельности, а также структуру системы управления. АМ позволяет проводить оценку эффективности ИМ на основании априорных данных. Роль и место АМ представлены на рисунке 1.



Рисунок 1 – Роль и место АМ взаимодействия ЛПР с КСА

Время реакции ЛПР на контролируемое им событие в системе управления определяется выражением [4–А]:

$$\tau_{\text{рк}} = \tau_{\text{в}} + \tau_{\text{р}} + \tau_{\text{п}} + \tau_{\text{м}}, \quad (2)$$

где $\tau_{\text{в}}$ – время восприятия сигнала; $\tau_{\text{р}}$ – время принятия решения; $\tau_{\text{п}}$ – время поиска необходимого органа управления; $\tau_{\text{м}}$ – время воздействия на орган управления.

Время восприятия сигнала определяется выражением [4–А]:

$$\tau_{\text{в}} = a + b \cdot I, \quad (3)$$

где a – константа, связанная со временем реакции ЛПР; b – константа, сопоставляемая со временем доведения информации о возникновении стимула; I – количество воспринимаемой информации, обычно выражаемое в битах.

Временной отрезок, необходимый для принятия решения, определяется выражением [4–А]: $\tau_{\text{р}} = a + I/V$, где V – скорость переработки информации. Этап исполнения решения подразделяется на поиск органа управления и воздействие на него. В условиях высокой однородности элементов ИМ и решения ЛПР известной задачи необходимое для этого время определяется выражением [4–А]:

$$\tau_{\text{п}} \approx n_{\text{поиска}} \cdot \overline{\tau_{\text{ф}}} + \delta, \quad (4)$$

где $n_{\text{поиска}}$ – математическое ожидание количества шагов поиска; $\overline{\tau_{\text{ф}}}$ – средняя продолжительность времени фиксации взгляда ЛПР (зоны, ограниченной углами зрения ЛПР шириной по 10° в обеих плоскостях матрицы средства представления информации (СПИ)); δ – эмпирическая константа, учитывающая условия, сопровождающие деятельность ЛПР.

Величина $n_{\text{поиска}}$ определяется путем анализа варианта построения системы управления и использования следующего соотношения [6–А, с. 81]:

$$n_{\text{поиска}} = \left(\frac{N}{Z} + 1 \right) / (M + 1), \quad (5)$$

где N – количество элементов информационного поля; Z – объем зрительного восприятия (количество элементов, одновременно попадающих в зону, ограниченную углами зрения ЛПР шириной по 10° в обеих плоскостях матрицы СПИ); M – количество объектов, обладающих заданным признаком.

Величина Z определяется при помощи следующего выражения:

$$Z = \frac{L_{\text{в}} \cdot L_{\text{г}}}{\sum_{i=1}^n l_i^{\text{в}} \cdot l_i^{\text{г}}}, \quad (6)$$

где $L_{\text{в}}$ и $L_{\text{г}}$ – размеры области СПИ, ограниченной углами по 10° в двух плоскостях соответственно; $l_i^{\text{в}}$ и $l_i^{\text{г}}$ – линейные размеры i -го элемента системы управления в соответствующих плоскостях СПИ; n – общее количество элементов системы управления в указанной области СПИ [16–А; 17–А].

Воздействие на орган управления связано с реализацией ЛПР функций в рамках решения, принятого на предыдущем этапе. Время, необходимое для этого, находится на основании выражения [4–А]:

$$\tau_{\text{м}} = \sum_{j=1}^S t_j, \quad (7)$$

где t_j – время, затрачиваемое ЛПР на выполнение j -й функции; S – общее количество функций в рамках реализации воздействия.

Таким образом, получен временной компонент АМ (рисунок 2).

Среднеквадратическое отклонение, характеризующее суммарную погрешность деятельности ЛПР, имеет вид [4–А]:

$$\sigma_{\text{лпр}} = \sqrt{\sigma_{\text{в}}^2 + \sigma_{\text{р}}^2 + \sigma_{\text{п}}^2 + \sigma_{\text{м}}^2}, \quad (8)$$

где слагаемые подкоренного выражения характеризуют ошибки восприятия ЛПР информации $\sigma_{\text{в}}$, принятия им решения $\sigma_{\text{р}}$, поиска органа управления $\sigma_{\text{п}}$ и осуществления управляющих воздействий $\sigma_{\text{м}}$ соответственно.

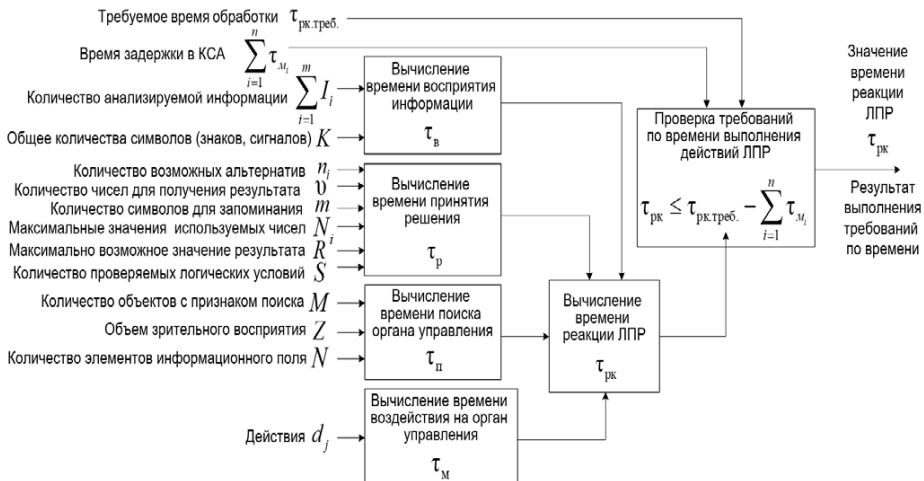


Рисунок 2 – Структура временного компонента АМ взаимодействия ЛПР с КСА

Ошибка восприятия информации описывается выражением [4–А]:

$$\sigma_v = \frac{X_k}{2 \cdot R \cdot \tau_{\Phi} \cdot (1 - P_{\Phi})}, \quad (9)$$

где X_k – значение контролируемого параметра, мм; R – коэффициент приведения показателя степени к безразмерному виду, с^{-1} ; P_{Φ} – вероятность фиксации взора ЛПР на контролируемом параметре.

Так как ЛПР РДЦ имеет достаточную теоретическую подготовку и практический опыт в принятии решений по управлению воздушным движением и в использовании ИМ, величиной σ_p можно пренебречь.

Ошибка ЛПР при поиске органа управления имеет вид [4–А]:

$$\sigma_{\text{п}} = \frac{X_{\text{орг}}}{2 \cdot R \cdot \tau_{\Phi} \cdot (1 - P_{\Phi_0})}, \quad (10)$$

где $X_{\text{орг}}$ – расстояние до необходимого органа управления, мм; P_{Φ_0} – вероятность фиксации взора ЛПР на необходимом органе управления.

Ошибка управляющих воздействий ЛПР описывает выражение [4–А]:

$$\sigma_M = 0,0074 \cdot D, \quad (11)$$

где D – амплитуда целенаправленного перемещения органа управления, мм.

Таким образом, получен точностной компонент АМ (рисунок 3).

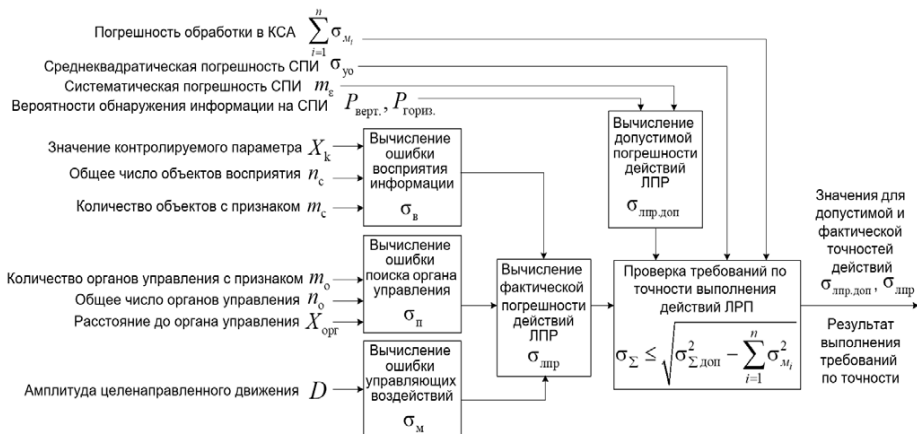


Рисунок 3 – Структура точностного компонента АМ взаимодействия ЛПП с КСА

Определение необходимых элементов системы управления для осуществления взаимодействия ЛПП с КСА производится следующим образом. Устанавливается очередность использования элементов (таблица 1).

Таблица 1 – Очередность использования элементов системы управления в алгоритмах ЛПП

Номер алгоритма, n	Номер обращения к элементу, m			
	1	2	...	$K_{\text{макс}}$
1	$C_1^{(1)}$	$C_2^{(1)}$	...	$C_{K_{\text{макс}}}^{(1)}$
2	$C_1^{(2)}$	$C_2^{(2)}$	...	$C_{K_{\text{макс}}}^{(2)}$
$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$		$\vdots$
$N_{\text{алг}}$	$C_1^{(N_{\text{алг}})}$	$C_2^{(N_{\text{алг}})}$	...	$C_{K_{\text{макс}}}^{(N_{\text{алг}})}$

Величина $C_m^{(n)}$ является номером элемента системы управления из группы, который используется в n -м алгоритме при m -м обращении к группе.

Составляется матрица очередности использования элементов системы управления при обращениях $\|P_{mj}\|$ (таблица 2).

Таблица 2 – Матрица очередности использования элементов системы управления при обращениях

Номер обращения, m	Номер элемента, j			
	1	2	...	$M_{\text{элемент.СУ}}$
1	P_{11}	P_{12}	...	$P_{1M_{\text{элемент.СУ}}}$
2	P_{21}	P_{22}	...	$P_{2M_{\text{элемент.СУ}}}$
$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$		$\vdots$
$K_{\text{макс}}$	$P_{K_{\text{макс}}1}$	$P_{K_{\text{макс}}2}$	...	$P_{K_{\text{макс}}M_{\text{элемент.СУ}}}$

Элементы матрицы очередности являются усредненной частотой применения j -го элемента при m -м обращении и определяются как:

$$P_{mj} = \frac{1}{N_{\text{алг}}} \cdot \sum_{n=1}^{N_{\text{алг}}} B_{mjn}, \quad (12)$$

где $B_{mjn} = 1$, если в n -м алгоритме при m -м обращении присутствует элемент j , в остальных случаях $B_{mjn} = 0$.

Затем строится матрица связности $\|S_{\xi\phi}\|$, в которой элементы представляют собой усредненную частоту следования элемента ϕ за элементом ξ (таблица 3), определяемую выражением:

$$S_{\xi\phi} = \frac{1}{N_{\text{алг}}} \cdot \sum_{n=1}^{N_{\text{алг}}} Y_{\xi\phi n}, \quad (13)$$

где $Y_{\xi\phi n}$ – событие, при котором в n -м алгоритме элемент ϕ следует за элементом ξ .

Таблица 3 – Матрица связности элементов в алгоритмах

Номер элемента	1	2	3	...	$M_{\text{элемент.СУ}}$
1		S_{12}	S_{13}	...	$S_{1M_{\text{элемент.СУ}}}$
2	S_{21}		S_{23}	...	$S_{2M_{\text{элемент.СУ}}}$
3	S_{31}	S_{32}		...	$S_{3M_{\text{элемент.СУ}}}$
:	:	:	:		:
$M_{\text{элемент.СУ}}$	$S_{M_{\text{элемент.СУ}} 1}$	$S_{M_{\text{элемент.СУ}} 2}$	$S_{M_{\text{элемент.СУ}} 3}$	...	

Первым в очереди элементом системы управления (M_1) для размещения на СПИ выбирается элемент, для которого величина P_{1M} является максимальной. В случае наличия нескольких подобных элементов в качестве первого выбирается любой из претендентов. В последующем производится возврат к данному шагу, выбирается другой претендент и процедура повторяется. Далее рассчитывается последовательность величин o_j , определяющая выбор очередного элемента системы управления для размещения на СПИ:

$$o_j = P_{\beta j} + \frac{1}{2} S_{M_{(\beta-1)} j} \quad (14)$$

для всех значений j , за исключением элементов, которые уже размещены.

Оценка эффективности вариантов размещения элементов в системе управления проводится при помощи показателя Δ [9–А], характеризующего

предпочтение нахождения элементов на позициях в очереди и количество элементов на позициях:

$$\Delta = \frac{1}{n_{\max}} \cdot \sum_{n=1}^{n_{\max}} \frac{2 \cdot (Y_n - 1) \cdot (n_{\max} - n + 1)}{n_{\max} \cdot (n_{\max} + 1)}, \quad (15)$$

где Y_n – количество элементов системы управления на n -й позиции в очереди; n – номер позиции в очереди; $n_{\max}$ – количество элементов в очереди.

В третьей главе диссертации, основные положения которой опубликованы в [3–А; 5–А; 13–А], решена задача определения количества уровней иерархии структуры ИМ / в зависимости от динамики изменения внешних условий (скорости изменения внешней среды S).

При анализе графика зависимости величины / от интенсивности внешних воздействий (рисунок 4) установлено [10–А], что при интенсивных изменениях внешней среды необходимо поддерживать достаточно простую организацию ИМ, усложняя ее по мере снижения интенсивности внешних воздействий.

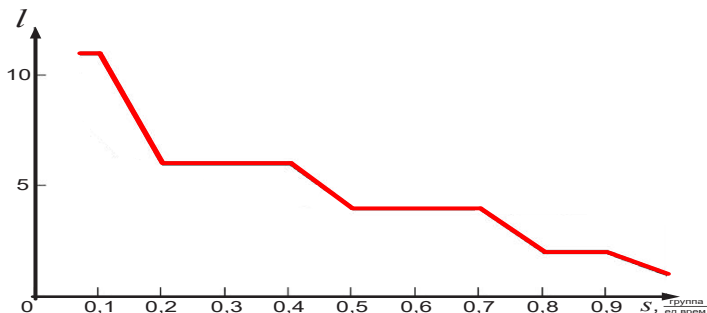


Рисунок 4 – Зависимость величины / от интенсивности внешних воздействий

Разработан алгоритм структурно-параметрического синтеза ИМ для поддержки принятия решений в АСУВД, основанный на игровом и вероятностном подходах к выбору управляющих решений в соответствии с принципом гарантированного результата (рисунок 5). В ходе синтеза устраняется противоречие между пропускной способностью ЛПР при заданных параметрах эффективности его деятельности и объемом анализируемой информации, а также ущерб, связанный с наступлением критических ситуаций.

Способность синтезируемой при помощи разработанного алгоритма ИМ для поддержки принятия решений отражать своим содержанием и объемом обстановку, а также состоятельность предлагаемой АМ проверяется в рамках апробирования экспертами динамических прототипов ИМ. Алгоритм синтеза ИМ предусматривает определение и реализацию целесообразных вспомогательных действий со стороны КСА, а также оценку эффективности синтезированной ИМ с участием экспертов путем решения двухкритериальной

задачи при помощи многофакторного показателя качества деятельности ЛПР. Алгоритм целесообразно использовать при разработке ИМ для поддержки принятия решений в АСУВД, предназначенных для функционирования в условиях высокой интенсивности воздушного движения.

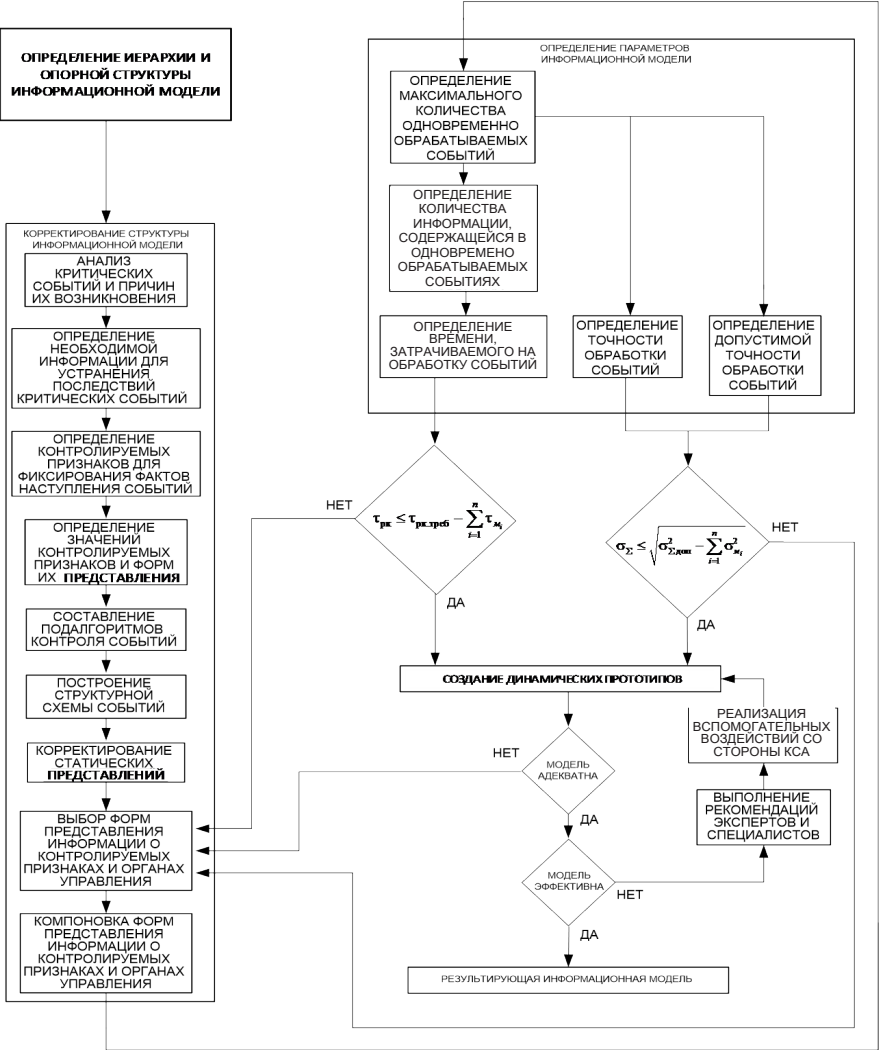


Рисунок 5 – Алгоритм синтеза ИМ для поддержки принятия решений в АСУВД

В четвертой главе диссертации, основные положения которой опубликованы в [7–А; 9–А; 18–А], был синтезирован фрагмент (действующий прототип) ИМ для поддержки принятия решений в АСУВД, соответствующий схеме поддержки принятия решений ЛПР, представленной на рисунке 6.

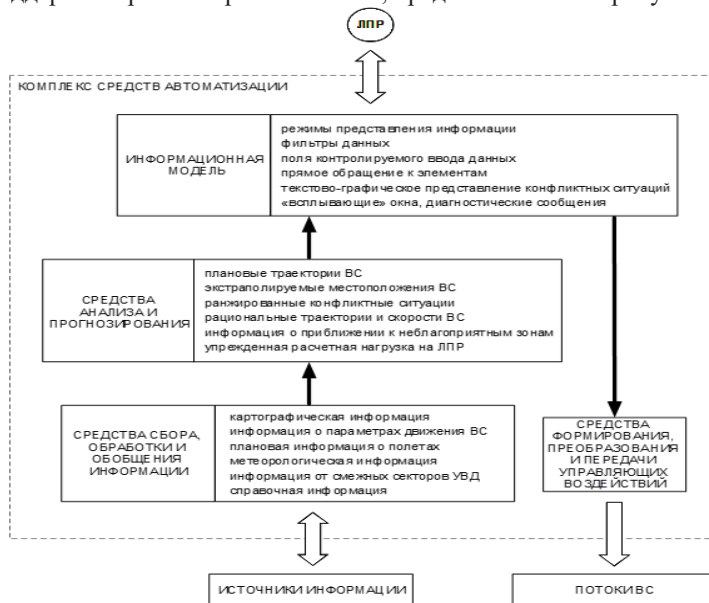


Рисунок 6 – Схема поддержки принятия решений ЛПР в АСУВД

Полученные в ходе эксперимента характеристики синтезированного и существующего фрагментов ИМ (при высоком уровне интенсивности воздушного движения) указали на преимущество синтезированного фрагмента по временному показателю не менее чем на 16 %, по точности – не менее чем на 49 % (таблица 4 и рисунок 7).

Таблица 4 – Сравнительные характеристики для фрагментов ИМ

Статистическая величина	Для существующего фрагмента ИМ	Для синтезированного фрагмента ИМ
Математическое ожидание, мм	11,2	9,4
Среднеквадратическое отклонение (СКО), мм	±11,6	±10,6
Количество допущенных ошибок	69	35
Количество элементов выборки	408	408

При этом усредненная вероятность безошибочной деятельности в синтезированном фрагменте ИМ возросла с 0,056 до 0,232 (для типовых условий). Значения СКО свидетельствовали о более стабильной деятельности ЛПР в синтезированном фрагменте.

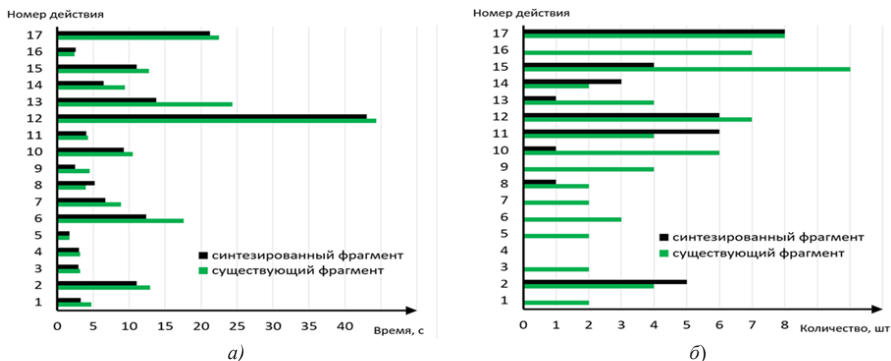


Рисунок 7 – Гистограммы: а) время выполнения действий; б) количество допущенных ошибок

Таким образом, оценка эффективности синтезированного фрагмента ИМ, произведенная методом полунатурного моделирования в условиях современной интенсивности воздушного движения и вынуждающих ЛПР осуществлять управление в критическом или аварийном режиме, указала на преимущество синтезированного фрагмента ИМ для поддержки принятия решений в АСУВД по сравнению с существующим.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные научные результаты диссертации

1. Проведен анализ ИМ для поддержки принятия решений в современных АСУВД, подходов и методов построения, критериев их оценки [1–А, с. 59; 3–А, с. 79, 85; 11–А; 14–А; 15–А]. Выявлены факторы, связанные с особенностями деятельности ЛПР в АСУ, существенно влияющие на качество его взаимодействия с КСА в современных условиях дефицита времени и высокой стоимости ошибки и не учитываемые ранее при разработке ИМ для поддержки принятия решений в АСУВД [12–А].

2. При помощи методов теорий игр и системного анализа обоснованы подход к разработке ИМ для поддержки принятия решений в АСУВД и критерии оценки ее эффективности [2–А, с. 64–71; 8–А, с. 99]. Проведен анализ методов математического моделирования процесса взаимодействия ЛПР с КСА.

3. На основе теории важности критериев разработан многофакторный показатель качества деятельности ЛПР, позволяющий решать двухкритериальную задачу оценки эффективности ИМ для поддержки принятия решений, а также наглядно характеризовать ее эффективность.

4. На основе теории информации и теории массового обслуживания разработана АМ взаимодействия ЛПР с КСА, позволяющая количественно

анализировать деятельность ЛПР с учетом определенного варианта построения ИМ, предъявлять требования к пропускной способности и точности его деятельности, производить оценку способа представления информации в ИМ на основании априорных данных. Построенная статистическая модель позволяет оценить точностную составляющую деятельности ЛПР [4–А, с. 37–44; 6–А, с. 79–86].

5. На основе игрового и вероятностного подходов к выбору управляющих решений разработан алгоритм структурно-параметрического синтеза ИМ для поддержки принятия решений в АСУВД [5–А, с. 80; 10–А; 13–А], использование которого позволяет формировать ИМ со структурой [9–А, с. 6] и параметрами, повышающими эффективность взаимодействия ЛПР с КСА в сравнении с существующими ИМ для поддержки принятия решений в АСУВД, по времени выполнения действий ЛПР не менее чем на 16 %, безошибочности выполнения действий ЛПР — не менее чем на 49 %, с доверительной вероятностью 0,95 и относительной погрешностью 10 %, а также по усредненной по всему набору действий вероятности безошибочной деятельности ЛПР с 0,056 до 0,232 (для типовых условий). В ходе синтеза ликвидированы противоречия между пропускной способностью ЛПР при заданных параметрах эффективности его деятельности и объемом анализируемой информации, а также ущерб, связанный с наступлением критических ситуаций в системе управления. В алгоритме учитываются замечания и рекомендации экспертов, а также предусмотрено определение вспомогательных действий со стороны КСА на основе современных информационных технологий [7–А, с. 154; 16–А; 17–А].

6. Синтезирован фрагмент ИМ для поддержки принятия решений в АСУВД, позволяющий имитировать деятельность ЛПР по управлению ВС [18–А]. Апробация фрагмента ИМ подтвердила его адекватность для поддержки принятия решений. В рамках апробации подтверждена состоятельность используемой АМ взаимодействия ЛПР с КСА. В ходе эксперимента проведен сравнительный анализ эффективности синтезированного фрагмента ИМ по отношению к существующему и выработаны рекомендации по совершенствованию ИМ для поддержки принятия решений, эксплуатируемых в Республике Беларусь АСУВД [7–А, с. 151].

Рекомендации по практическому использованию результатов

Многофакторный показатель качества деятельности ЛПР прост в использовании, инвариантен к назначению, целям, решаемым задачам и сложности АСУ, позволяет решать двухкритериальную задачу оценки эффективности ИМ по временной и точностной составляющим, а также наглядно характеризовать эффективность ИМ [8–А, с. 99]. Разработанная АМ взаимодействия ЛПР с КСА способствует повышению эффективности функционирования системы управления путем учета факторов, оказывающих существенное влияние на управление в условиях дефицита времени и высокой

стоимости ошибки в АСУ специального назначения (управления опасными объектами, станций скорой медицинской помощи, транспортных задач и т. п.) [4–А, с. 42–44]. Использование АМ позволит сократить объем трудоемких экспериментальных исследований, связанных с многовариантностью деятельности ЛПР при разработке ИМ для поддержки принятия решений в АСУВД. Использование алгоритма синтеза при разработке ИМ для поддержки принятия решений в АСУВД позволит повысить эффективность деятельности ЛПР в условиях высокой интенсивности воздушного движения [5–А, с. 90]. Результаты исследований эффективности ИМ позволят оценивать и совершенствовать ИМ для поддержки принятия решений в существующих АСУ.

Алгоритм построения ИМ для поддержки принятия решений может быть использован при разработке ИМ для переносных КСА командиров мобильных, аэромобильных и подразделений специального назначения, эксплуатирующих КСА в условиях различных воздействий внешней среды (яркое солнце, дождь, вибрации, дымка и т. п.), что подтверждается актом о практическом использовании результатов исследования в ходе учения Коллективных сил оперативного реагирования ОДКБ «Взаимодействие-2013» от Командования сил специальных операций Вооруженных Сил Республики Беларусь в 2013 году.

Алгоритм синтеза ИМ для поддержки принятия решений в АСУВД может быть использован при разработке комплексов для обучения ЛПР для АСУ, функционирующих в условиях реального масштаба времени и высокой стоимости ошибки, что подтверждается актом о практическом использовании результатов исследования при разработке постановок задач изделия 9С910 (опытно-конструкторская работа «Плиса») от ОАО «АГАТ-системы управления» – управляющей компании холдинга «Геоинформационные системы управления» в 2015 году. АМ и алгоритм синтеза ИМ для поддержки принятия решений в АСУВД использованы при выполнении опытно-конструкторской работы «Разработка программного обеспечения и конструкторской документации КСА УВД на базе модуля обработки радиолокационной информации» (шифр «Сапфир»), что подтверждается актом о практическом использовании результатов исследования от ОАО «АГАТ-системы управления» – управляющей компании холдинга «Геоинформационные системы управления» в 2019 году.

Синтезированный фрагмент ИМ для поддержки принятия решений в АСУВД использован в учебном процессе по программе специальности «Организация движения и обеспечение полетов на воздушном транспорте» по дисциплине «Правила, процедуры, технология обслуживания воздушного движения» (при выполнении лабораторных и практических работ, а также при выполнении заданий для самоконтроля), что подтверждается актом о практическом использовании результатов исследования от УО «Белорусская государственная академия авиации» в 2019 году.

Получен патент «Устройство проектирования интерфейса».

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ СОИСКАТЕЛЯ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ

Статьи в научных журналах в соответствии с п. 19

Положения о присуждении ученых степеней и присвоении ученых званий

1–А. Каледа, А. Е. Повышение эффективности боевой работы оператора автоматизированной системы управления противовоздушной обороны / А. Е. Каледа, С. В. Кругликов, Д. И. Рабченко // Вестн. Воен. акад. Респ. Беларусь. – 2011. – № 1. – С. 54–59.

2–А. Кругликов, С. В. Анализ подходов к построению информационной модели боевой обстановки в условиях неопределенности / С. В. Кругликов, Д. И. Рабченко // Вестн. Воен. акад. Респ. Беларусь. – 2012. – № 1. – С. 64–71.

3–А. Кругликов, С. В. Способ реализации информационной модели обстановки в автоматизированной системе управления / С. В. Кругликов, Д. И. Рабченко // Докл. БГУИР. – 2014. – № 8 (86). – С. 79–85.

4–А. Кругликов, С. В. Аналитическая модель взаимодействия оператора с информационной моделью автоматизированного рабочего места в условиях динамично меняющейся обстановки / С. В. Кругликов, Д. И. Рабченко // Информационно-измерительные и управляющие системы. – 2016. – № 3. – С. 37–44.

5–А. Рабченко, Д. И. Методика синтеза информационной модели боевой обстановки / Д. И. Рабченко // Информатика. – 2017. – № 1. – С. 78–91.

6–А. Капцевич, О. А. Временная составляющая аналитической модели действий диспетчера управления воздушным движением / О. А. Капцевич, А. В. Дубовский, Д. И. Рабченко // Докл. БГУИР. – 2019. – № 5 (123). – С. 79–86.

7–А. Капцевич, О. А. Экспериментальные исследования интерфейса, разработанного с использованием методики синтеза информационной модели на автоматизированном рабочем месте диспетчера управления воздушным движением / О. А. Капцевич, Д. И. Рабченко, К. Ю. Пономарев // Докл. БГУИР. – 2019. – № 7-8 (126). – С. 149–156.

Статьи в других рецензируемых научных изданиях

8–А. Капцевич, О. А. Оценка эффективности деятельности диспетчера в автоматизированной системе управления воздушным движением / О. А. Капцевич, Д. И. Рабченко // Сб. науч. ст. Воен. акад. Респ. Беларусь. – 2018. – № 35. – С. 92–102.

9–А. Капцевич, О. А. Определение структуры пользовательского интерфейса диспетчера управления воздушным движением / О. А. Капцевич, А. В. Дубовский, Д. И. Рабченко // Авиац. вестн. – 2020. – № 3. – С. 6–12.

10–А. Рабченко, Д. И. Методика структурного синтеза информационной модели боевой обстановки на автоматизированном рабочем месте лица, принимающего решение / Д. И. Рабченко // Информационные технологии и системы : материалы междунар. науч. конф., Минск, 29 октября 2014 г. / редкол.: Л. Ю. Шилин [и др.]; Учрежд. образования «Белорус. гос. ун-т информатики и радиоэлектроники». – Минск, 2014. – С. 78.

11–А. Рабченко, Д. И. Показатель качества информационной модели в комплексе средств автоматизации управления воздушным движением / Д. И. Рабченко, О. А. Капцевич // Авиация: история, современность, перспективы развития: материалы III Междунар. заочной науч.-практ. конф., Минск, 8–9 ноября 2018 г.; редкол.: М.В. Кудин [и др.]; Учрежд. образования «Белорус. гос. акад. авиации». – Минск, 2018. – С. 29–31.

12–А. Рабченко, Д. И. Повышение эффективности деятельности диспетчеров военного и гражданского секторов Единой системы организации воздушного движения Республики Беларусь : материалы VIII Междунар. науч. конф. по воен.-техн. проблемам, проблемам обороны и безопасности, использования технологий двойного применения, Минск, 16–17 мая 2019 г. / Д. И. Рабченко, О. А. Капцевич, А. В. Дубовский; Гос. воен.-промышл. комитет Респ. Беларусь: в 5 ч. – Минск, 2019. – Ч. 5. – С. 29–32.

13–А. Рабченко, Д. И. Алгоритм разработки структуры информационной модели на автоматизированном рабочем месте управления воздушным движением / Д. И. Рабченко, А. В. Дубовский, М. С. Дубовская // Авиация: история, современность, перспективы развития : материалы V Междунар. науч.-практ. конф., Минск, 22 октября 2020 г. / редкол.: А. А. Жукова [и др.]; Учрежд. образования «Белорус. гос. акад. авиации». – Минск, 2020. – С. 288–290.

Тезисы докладов

14–А. Рабченко, Д. И. Подход к формированию информационной модели обстановки в АСУ ПВО / Д. И. Рабченко, А. Е. Каледа, С. В. Кругликов // Актуальные аспекты инновационного развития вооруженных сил с учетом характера войн будущего : тез. докл. Междунар. воен.-науч. конф., Минск, 30–31 марта 2011 г.; редкол.: Т. Я. Талейкина [и др.]; Учрежд. образования «Воен. акад. Респ. Беларусь». – Минск, 2011. – С. 36.

15–А. Рабченко, Д. И. Подход к реализации информационной модели обстановки в АСУ тактического звена / Д. И. Рабченко, С. В. Кругликов // Современная военно-техническая политика: проблемы и перспективы : тез. докл. Междунар. воен.-науч. конф., Минск, 21–22 марта 2013 г.; редкол.:

Т. Я. Талейкина [и др.]; Учрежд. образования «Воен. акад. Респ. Беларусь». – Минск, 2013. – С. 162.

16–А. Рабченко, Д. И. Применение современных средств отображения-управления на автоматизированных рабочих местах АСУ тактического звена управления / Д. И. Рабченко // Применение современных информационных технологий с учетом особенностей сетецентрических подходов к военным действиям : тез. докл. V ежегод. науч.-практ. семинара по связи, Минск, 29 января 2014 г.; редкол.: В. Э. Станкевич [и др.]; Учрежд. образования «Воен. акад. Респ. Беларусь». – Минск, 2014. – С. 6.

17–А. Рабченко, Д. И. Применение современных средств отображения-управления на автоматизированных рабочих местах в сложных системах управления / Д. И. Рабченко, С. В. Кругликов // Новые математические методы и компьютерные технологии в проектировании, производстве и научных исследованиях : тез. докл. XVII Республиканской науч. конф. студ. и аспирантов, Гомель, 24–26 марта 2014 г.; редкол.: О. М. Демиденко [и др.]; учрежд. образования «Гомел. гос. ун-т им. Ф. Скорины». – Гомель, 2014. – Ч. 2. – С. 223–225.

18–А. Рабченко, Д. И. Проблемы динамического прототипирования информационной модели боевой обстановки / Д. И. Рабченко // Обеспечение военной безопасности государства: проблемы и перспективы : тез. докл. Междунар. воен.-науч. конф., Минск, 23–24 марта 2017 г. / редкол.: Т. Я. Талейкина [и др.]; Учрежд. образования «Воен. акад. Респ. Беларусь». – Минск, 2017. – С. 460.

Патент

19–А. Устройство проектирования интерфейса: полез. модель ВУ 11484 / Ю. И. Мосиенко, О. В. Прищепный, С. В. Кругликов, Д. И. Рабченко. – Оpubл. 17.02.2017.

РЭЗЮМЭ

Рабчонак Дзмітрый Іванавіч

Сінтэз інфармацыйнай мадэлі для падтрымкі прыняцця рашэнняў пры кіраванні паветраным рухам

Ключавыя словы: аўтаматызаваная сістэма кіравання, інтэнсіўнасць паветранага руху, інфармацыйная мадэль, асоба, якая прымае рашэнне, эфектыўнасць дзейнасці, часовыя і дакладнасныя паказчыкі.

Мэта работы – павышэнне эфектыўнасці дзейнасці асобы, якая прымае рашэнне, пры выкананні функцый па кіраўніцтве патокамі паветраных судоў за кошт выкарыстання ўдасканаленай інфармацыйнай мадэлі для падтрымкі прыняцця рашэнняў.

Метады даследавання: пабудова дрэва падзей, структурны аналіз, GOMS, KLM, паўнатурнае мадэляванне, статыстычная ацэнка.

Выкарыстаная апаратура: комплекс сродкаў аўтаматызацыі з функцыянальнымі дынамічнымі прататыпамі.

Асноўнымі навуковымі вынікамі працы з'яўляюцца:

- аналіз інфармацыйных мадэляў для падтрымкі прыняцця рашэнняў сучасных аўтаматызаваных сістэм кіравання паветраным рухам, падыходаў і метадаў пабудовы, крытэрыяў іх ацэнкі;

- аналітычная мадэль узаемадзеяння асобы, якая прымае рашэнне, з комплексам сродкаў аўтаматызацыі, што дазваляе вырашаць задачу ацэнкі эфектыўнасці інфармацыйнай мадэлі па часовым, дакладным і структурным складніках;

- алгарытм структурна-параметрычнага сінтэзу інфармацыйнай мадэлі для падтрымкі прыняцця рашэнняў у аўтаматызаванай сістэме кіравання паветраным рухам, выкарыстанне якога дазваляе фарміраваць інфармацыйную мадэль са структурай і параметрамі, што павышаюць эфектыўнасць дзейнасці асобы, якая прымае рашэнне.

Рэкамендацыі па выкарыстанні: навукова-метадычны апарат можа быць выкарыстаны пры стварэнні новых і мадэрнізацыі існуючых інфармацыйных мадэляў для падтрымкі прыняцця рашэнняў у аўтаматызаваных сістэмах кіравання паветраным рухам.

Галіна прымянення: распрацоўка і ўдасканаленне аўтаматызаваных сістэм кіравання паветраным рухам.

РЕЗЮМЕ

Рабоченко Дмитрий Иванович

Синтез информационной модели для поддержки принятия решений при управлении воздушным движением

Ключевые слова: автоматизированная система управления, интенсивность воздушного движения, информационная модель, лицо, принимающее решение, эффективность деятельности, временные и точностные показатели.

Цель работы – повышение эффективности деятельности лица, принимающего решение, при выполнении функций по руководству потоками воздушных судов за счет использования усовершенствованной информационной модели для поддержки принятия решений.

Методы исследования: построение дерева событий, структурный анализ, GOMS, KLM, полунатурное моделирование, статистическая оценка.

Используемая аппаратура: комплекс средств автоматизации с функциональными динамическими прототипами.

Основными научными результатами работы являются:

- анализ информационных моделей для поддержки принятия решений современных автоматизированных систем управления воздушным движением, подходов и методов построения, критериев их оценки;
- аналитическая модель взаимодействия лица, принимающего решение, с комплексом средств автоматизации, позволяющая решать задачу оценки эффективности информационной модели по временной, точностной и структурной составляющим;
- алгоритм структурно-параметрического синтеза информационной модели для поддержки принятия решений в автоматизированной системе управления воздушным движением, использование которого позволяет формировать информационную модель со структурой и параметрами, повышающими эффективность деятельности лица, принимающего решение.

Рекомендации по использованию: научно-методический аппарат может быть использован при создании новых и модернизации существующих информационных моделей для поддержки принятия решений в автоматизированных системах управления воздушным движением.

Область применения: разработка и совершенствование автоматизированных систем управления воздушным движением.

RESUME

Rabchenok Dmitry Ivanovich

Synthesis of an information model to support decision-making in air traffic control

Keywords: automated control system, air traffic intensity, information model, decision maker, operational efficiency, time and accuracy indicators.

The purpose of the study – improving the efficiency of the decision-maker when performing the functions of managing aircraft flows through the use of an improved information model to support decision-making.

Research methods: event tree construction, structural analysis, GOMS, KLM, semi-natural modeling, statistical evaluation.

The equipment used: a complex of automation tools with functional dynamic prototypes.

The main scientific results of the work are:

- analysis of information models to support decision-making of modern automated air traffic control systems, approaches and methods of construction, criteria for their evaluation;
- analytical model of interaction of a decision-maker with a complex of automation tools, which allows solving the problem of evaluating the effectiveness of an information model by time, accuracy and structural components;
- an algorithm of structural-parametric synthesis of information model to support decision-making in an automated air traffic control system, the use of which allows you to form an information model with a structure and parameters that increase the efficiency of the decision-maker.

Recommendations for use: the scientific and methodological apparatus can be used in the creation of new and modernization of existing information models to support decision-making in automated air traffic control systems.

Scope: development and improvement of automated air traffic control systems.



Подписано в печать 16.01.2025. Формат 60×84 ¹/₁₆. Бумага офсетная.
Цифровая печать. Усл. печ. л. 1,39. Уч.-изд. л. 1,5.
Тираж 60 экз. Заказ 3.

Отпечатано с оригинала-макета заказчика
в республиканском унитарном предприятии
«Издательский центр Белорусского государственного университета».
Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя,
распространителя печатных изданий № 2/63 от 19.03.2014.
Ул. Красноармейская, 6, 220030, Минск.