

УДК 629.7.058

DOI 10.51955/2312-1327\_2023\_3\_45

## СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ МЕТОДОВ РАЗРАБОТКИ АВИАЦИОННЫХ АДАПТИВНЫХ СИСТЕМ И ОБОБЩЕННЫЙ МЕТОД MFTA/GDTA/CTA/CWA

*Геннадий Владимирович Коваленко,  
orcid.org/0000-0002-4849-8878,  
доктор технических наук, профессор  
Санкт-Петербургский государственный университет  
гражданской авиации имени главного маршала авиации А.А. Новикова,  
ул. Пилотов, д. 38  
Санкт-Петербург, 196210, Россия  
kgvf@inbox.ru*

*Илья Александрович Ядров,  
orcid.org/0009-0007-3978-6345,  
Санкт-Петербургский государственный университет  
гражданской авиации имени главного маршала авиации А.А. Новикова,  
ул. Пилотов, д. 38  
Санкт-Петербург, 196210, Россия  
yadrov.ilya@gmail.com*

**Аннотация.** Результаты внедрения автоматизированных технологий в различные области авиационно-транспортной системы свидетельствуют о положительном влиянии автоматизации на уровень безопасности и эффективности полетов. Тем не менее, автоматизация различных процессов приводит к ситуации, когда возможности современной техники значительно превосходят ограниченные возможности человека-оператора: этот факт свидетельствует о необходимости применения направленного на обеспечение благоприятного взаимодействия с человеком подхода к созданию автоматизированных авиационных систем. Данная статья посвящена вопросам методологии в области создания авиационных адаптивных систем (АС): в работе проводится сравнительный анализ наиболее популярных аналитических методов разработки АС, а также предлагается обобщенный способ проведения анализа MFTA/GDTA/CTA/CWA, разработанный на основе применения методов расчленения, морфологического анализа и объединения. Предлагаемый обобщенный метод предполагает следующие этапы проведения: 1) анализ цели и задач; 2) анализ подзадач и требований по обеспечению ситуационной осведомленности; 3) когнитивный анализ. По результатам этапов создаются перечень основных задач системы, полная структурная схема разрабатываемой АС, а также схема когнитивного анализа, способствующая определению наиболее вероятных ошибок оператора для каждого критического этапа функционирования системы. Достоинства предлагаемого обобщенного метода анализа заключаются в том, что его проведение сосредоточено на обеспечении ситуационной осведомленности оператора, а также позволяет оценить риски, вызванные внешней средой функционирования системы, с целью определения оптимального уровня адаптации и способа поддержки членов экипажа ВС со стороны автоматизации на каждом этапе их взаимодействия.

**Ключевые слова:** автоматизация, авиационная автоматика, человеко-машинные системы, адаптивные системы, методы анализа, MFTA, HTA, GDTA, CTA, CWA.

# COMPARATIVE ANALYSIS OF METHODS FOR DEVELOPING AVIATION ADAPTIVE SYSTEMS AND THE GENERALIZED MFTA/GDTA/CTA/CWA METHOD

*Gennadiy V. Kovalenko,  
orcid.org/0000-0002-4849-8878,  
Doctor of technical sciences, professor  
St. Petersburg State University of Civil Aviation  
named after Air Chief Marshal A.A. Novikov,  
38, street of Pilots  
Saint-Petersburg, 196210, Russia  
kgvf@inbox.ru*

*Ilya A. Yadrov,  
orcid.org/0009-0007-3978-6345,  
St. Petersburg State University of Civil Aviation  
named after Air Chief Marshal A.A. Novikov,  
38, street of Pilots  
Saint-Petersburg, 196210, Russia  
yadrov.ilya@gmail.com*

**Abstract.** The results of implementing automated technologies in various areas of the air transportation system demonstrate a positive impact of automation on the level of safety and efficiency of flights. However, this leads to a situation where the capabilities of modern technology significantly exceed the limited capabilities of a human operator: this fact indicates the necessity of applying a special approach directed at ensuring favorable interaction with humans in creating automated aviation systems. The paper is devoted to the methodology issues in the field of creating aviation adaptive systems (AS) and provides a comparative analysis of the most popular analytical methods for AS development. Additionally, a generalized method for conducting the MFTA/GDTA/CTA/CWA analysis is proposed, which is developed based on the methods of dismemberment, morphological analysis, and combination. The proposed generalized method involves the following stages: 1) analysis of goals and tasks; 2) analysis of subtasks and requirements for ensuring situational awareness; 3) cognitive analysis. As a result of these stages, the list of the main tasks of the system, a complete structural scheme of the developed AS and a cognitive analysis scheme, which contributes to determining the most probable errors of the operator for each critical stage of system functioning, are created. The advantages of the proposed generalized method lie in the fact that its implementation focuses on ensuring the operator's situational awareness, and allows for the evaluation of risks caused by the external environment of the system functioning in order to determine the optimal level of adaptation and the way to support the crew members of the aircraft by the automation at each stage of their interaction.

**Keywords:** automation, aviation automatics, human-machine systems, adaptive systems, analysis methods, MFTA, HTA, GDTA, CTA, CWA.

## Введение (Introduction)

По мере усложнения человеко-машинных систем, в том числе и авиационных, зачастую возникает необходимость контролировать их с помощью автоматики, т. е. использовать устройства, которые выполняют, полностью или частично, функцию, которую мог бы выполнять человек [Parasuraman et al., 2000, p. 287]. Эта тенденция объясняется, в частности, ограниченными возможностями человека-оператора по сравнению с возможностями современной техники. Так, в отечественной психологии отмечается [Котик, 1978, с. 156-157; Цибулевский,

1979, с. 159], что в процессе формирования человеком-оператором концептуальной модели реальности могут появляться ошибки, причинами которых становится он сам; кроме того, для человека характерны ограниченные память, объем и концентрация внимания, а также сравнительно небольшая продолжительность состояния сосредоточенности [Wickens, 2012, p. 379].

Одним из главных последствий перехода к эксплуатации высокоавтоматизированных воздушных судов (ВС) стало очевидное благоприятное влияние на уровень безопасности воздушных перевозок: в то время как на автоматизированных самолетах число погибших пассажиров на 1 млн перевезенных составляет 0,03, на ВС предыдущего поколения этот показатель безопасности принимает значение 0,3, т. е. на порядок ниже [Коваленко и др., 2017, с. 28]. В работе [Billings, 2018, p. 22-24] подчеркиваются четыре главных преимущества применения авиационной автоматики: повышение уровня безопасности, надежности, экономичности и комфорта.

Тем не менее, сложно не согласиться с утверждением, что активное участие человека играет существенную роль в функционировании даже наиболее передовых автоматизированных систем: их эксплуатация обусловлена влиянием как технического, так и человеческого факторов [Bibby, 1975, p. 680]. В настоящее время специалисты в области человеческого фактора все больше обеспокоены стремительной автоматизацией разнообразных процессов и применением «технологического императива», в соответствии с которым любая область человеческой деятельности должна быть автоматизирована в максимальной степени [Onnasch, 2014, p. 478]: такой подход может привести к различным негативным последствиям, таким как снижение качества выполнения задач и увеличение вероятности возникновения ошибок оператора [Cummins, 2017, p. 291]. Таким образом, поскольку обеспечить использование современных автоматизированных систем без участия человека-оператора невозможно, необходим особый, ориентированный на взаимодействие с человеком подход к их созданию [Ядров, 2023, с. 153], наиболее полно реализующийся в концепции *адаптивной автоматики*.

Свойство адаптации проявляется в возможности осуществления *внешней адаптации* – способности системы эффективно приспосабливаться к изменяющимся условиям окружающей среды, а также *внутренней адаптации* – способности системы изменять режим работы в зависимости от текущего психофизиологического состояния оператора и показателей эффективности его деятельности [Коваленко и др., 2022, с. 6]. Чаще всего адаптация реализуется посредством изменения текущего уровня автоматизации с целью поддержания рабочей нагрузки оператора на оптимальном уровне [Ядров, 2022, с. 183], однако функционирование адаптивной системы также может основываться на способности системы динамически перераспределять задачи между человеком и автоматикой, изменять приоритет выполнения задач, способ взаимодействия с оператором или параметры предоставляемой оператору информации, включая изменение степени ее детализации [Hou et al., 2014, p. 158].

Среди экспериментальных подтверждений эффективности использования адаптивных систем (АС) можно выделить возможность с их помощью

регулировать рабочую нагрузку человека [Parasuraman et al., 1999, p. 121], а также поддерживать ситуационную осведомленность оператора на значительно более высоком уровне по сравнению с системами, использующими традиционную автоматику [Kaber et al., 2004, p. 150]. Кроме того, свое практическое применение адаптивные системы нашли при осуществлении таких проектов, как авиационная интеллектуальная адаптивная система, созданная в рамках программы «Умной кабины» (Cognitive Cockpit research program) [Taylor et al., 2017, p. 86-87], и адаптивный интерфейс, обеспечивающий управление группой из нескольких беспилотных летательных аппаратов (UAV Control Interface project) [Hou et al., 2005, p. 2466-2467]. Таким образом, в настоящее время наблюдается активное внедрение адаптивной автоматики в авиации, что обуславливает актуальность работ по совершенствованию и практической реализации аналитических методов разработки авиационных АС.

Прежде чем приступить к созданию адаптивной системы, важно провести комплексный анализ выполняемой оператором работы и окружающей среды, в условиях которой будет осуществляться функционирование системы, а также определить возможные трудности и препятствия, с которыми человек может столкнуться в процессе реализации своей деятельности в качестве элемента АС. Аналитические методы разработки адаптивных систем направлены на изучение указанных аспектов их функционирования с целью выявления индивидуальных особенностей конкретной системы, что может позволить скорректировать общие принципы и подходы к созданию АС применительно к конкретной системе, а также оптимизировать применяемые алгоритмы для обеспечения ее устойчивой и эффективной работы.

Таким образом, целью данной работы является проведение сравнительного анализа методов разработки авиационных адаптивных систем, а также обоснование перспективы применения предлагаемого авторами обобщенного метода анализа авиационных систем. Данная цель в работе достигается путем решения следующих задач: 1) анализ существующих аналитических методов разработки АС; 2) определение принципов предлагаемого обобщенного метода анализа; 3) оценка потенциальных преимуществ применения такого метода для создания авиационных АС.

### **Материалы и методы (Materials and methods)**

Материалом работы послужили тексты теоретических исследований ведущих специалистов в области разработки адаптивной автоматики, предлагающие наиболее популярные аналитические методы анализа, применяемые при создании сложных систем. Авторами были выделены основные достоинства и недостатки каждого из рассматриваемых методов.

#### *Анализ целей, действий и задач (Mission, Function and Task Analysis, MFTA)*

Метод MFTA, первоначально разработанный для создания военных систем, успешно применяется на протяжении уже более, чем пятидесяти лет [Chow et al., 2006, p. 521]. Название метода соответствует основным этапам проводимого с его помощью анализа [Brace et al., 2012, p. 878]:

1. *Анализ целей*: на данном этапе определяется цель функционирования системы, а также указываются основные типы решаемых ею задач и посредством выбора соответствующего уровня автоматизации [Kaber et al., 2004, p. 133] определяется роль оператора в системе;

2. *Анализ действий*: описываются предполагаемые функциональные возможности системы;

3. *Распределение функций* между оператором и автоматикой;

4. *Анализ задач*, необходимых для достижения поставленной цели, а также их разделение на более мелкие подзадачи;

5. *Прогнозирование производительности* системы в различных условиях, осуществляющееся путем определения предполагаемых времени выполнения задачи, значений уровня рабочей нагрузки оператора, а также вероятности возникновения ошибок.

*Достоинства*: такой способ анализа позволяет получить полное представление о ходе выполнения задачи [Brace et al., 2012, p. 901]; он является строгим и требует систематического и последовательного проведения.

*Недостатки*: применение метода MFTA в сложных системах требует тщательного рассмотрения большого количества задач; работа с данным методом сложна и требует значительного обучения [Bernier et al., 2014, p. 18-19].

#### *Иерархический анализ задач (Hierarchical Task Analysis, HTA)*

В основе метода HTA лежит принцип разделения сложных задач на ряды мелких подзадач [Annette et al., 1967, p. 214], причем отношения между задачами и подзадачами подчиняются строгой иерархической организации. Выполнение анализа HTA заключается в последовательном выполнении шагов:

1. *Определение цели анализа* (например, разработка новой системы или процедуры выполнения задачи, анализ рабочей нагрузки оператора и т. д.);

2. *Определение границ описания системы*;

3. *Сбор информации*, включая проведение наблюдений, интервью с экспертами, изучение руководств по эксплуатации аналогичных систем и т. д.;

4. *Описание цели, задач и подзадач системы* – создание классической структурной схемы описываемой АС (рис. 1);

5. *Сведение числа подзадач к минимуму*;

6. *Обеспечение возможности повторного проведения анализа*: анализ простой системы может потребовать не менее трех проведений, в то время как анализ сложной системы – до десяти и более [Annette et al., 1967, p. 219].

*Достоинства*: простота и общедоступность средств осуществления [Annette et al., 1998, p. 1534].

*Недостатки*: необходимость последовательного и тщательного разбора большого количества небольших элементарных операций, из которых складывается функционирование системы [Stanton, 2006, p. 77].

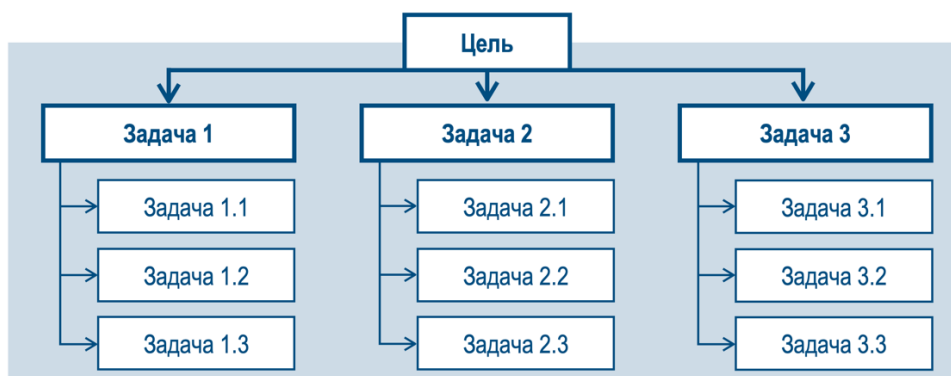


Рисунок 1 – Структурная схема в анализе НТА. *Источник:*  
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0003687005000980?via%3Di>  
*hub*

### *Целеориентированный анализ задач (Goal-Directed Task Analysis, GDTA)*

Способ анализа GDTA был разработан специально для удовлетворения требованию обеспечения ситуационной осведомленности оператора [Stanton, 2016, р. 2-3], которую можно определить как совокупность: 1) комплексного восприятия элементов окружающей среды; 2) понимания их текущего значения; и 3) проекции их состояния на ближайшее будущее и прогнозирование того, каким образом различные действия и возмущения могут повлиять на их значения [Bolstad et al., 2002, р. 474].

Метод GDTA основан на анализе трех центральных элементов обеспечения функционирования системы; метод заключается в определении: 1) цели; 2) задач для ее достижения; а также 3) требований к информации, необходимой оператору на каждом этапе выполнения задания.

*Достоинства:* результаты исследования [Endsley et al., 2003, р. 269-270] продемонстрировали, что использование такого подхода действительно способствует повышению ситуационной осведомленности оператора при работе в сложных условиях.

*Недостатки:* метод не предусматривает создания четкой последовательности выполняемых задач, а также возможности прогнозирования уровня производительности оператора и системы.

### *Когнитивный анализ задач (Cognitive Task Analysis, CTA)*

Анализ CTA предлагает более расширенный подход, чем рассмотренные ранее методы анализа, и используется, главным образом, для получения информации о мыслительных процессах, лежащих в основах выполнения экспертами *сложных задач* [Chipman et al., 2000, р. 21-23]. В рамках подхода CTA под сложными понимаются такие задачи, выполнение которых требует интегрированного использования как контролируемых (сознательных, концептуальных), так и автоматизированных (бессознательных, процедурных) знаний оператора [Van Merriënboer et al., 2002, р. 44]. На основе анализа работ [Chipman et al., 2000, р. 21-30; Clark et al., 2008, р. 583-590; Coffey et al., 2003, р. 45-48; Crandall et al., 2006, р. 148-192] авторами были выделены пять основных этапов проведения анализа CTA:

1. *Сбор предварительных данных*, предусматривающий проведение:

а) анализа документов, в том числе с целью выявления возможных расхождений между требованиями юридических документов и повседневной практикой реализации задач [Lee et al., 2003, p. 7-8];

б) наблюдений за работой экспертов;

в) неструктурированных интервью с экспертами для обзора изучаемой предметной области;

2. *Выбор предполагаемого способа отображения результатов анализа*: метод СТА предполагает возможность применения таких инструментов, как концептуальные карты, семантические сети, блок схемы и др. [Militello et al., 1998, p. 1633-1636]; выбор наиболее подходящего из них основывается на изучении аналитиками требований к знаниям, которыми должен обладать оператор для выполнения задач;

3. *Применение методов СТА* для определения когнитивных процессов, обуславливающих решение сложных задач. Наиболее распространенными методами являются различного рода интервью, в частности:

а) Метод концепций, процессов и принципов (Concepts, Processes, and Principles, CPP) – способ проведения многоэтапного интервью, в процессе которого фиксируются «бессознательные знания», полученные экспертами на практике [Chipman et al., 2000, p. 28-29]: для его реализации одна и та же процедура описывается несколькими экспертами, после чего полученные описания сравниваются;

б) Метод критических решений (Critical Decision Method, CDM) – способ проведения интервью, предназначенный для выявления «сигналов восприятия», бессознательно считываемых экспертами и определяющих характер их действий в случае возникновения нестандартных ситуаций: аналитик и эксперт выбирают нестандартную ситуацию из опыта эксперта и в процессе ее тщательного рассмотрения определяют: 1) сигналы восприятия; 2) примененные экспертом предварительные знания; 3) альтернативные решения; 4) факторы, повлиявшие на выбор конкретного решения;

4. *Анализ и проверка данных*, которые предоставляются участвующим в проведении анализа экспертам с целью уточнения полученной информации, а затем сравниваются с выводами других экспертов;

5. *Оформление результатов анализа*, чаще всего в виде таблиц когнитивных требований [Crandall et al., 2006, p. 189-190]: в них для каждой задачи указываются: 1) необходимые предварительные знания; 2) возможные причины трудностей при выполнении задачи; 3) распространенные ошибки оператора; 4) необходимая помощь со стороны разрабатываемой системы.

*Достоинства*: метод СТА позволяет провести комплексный анализ выполняемых оператором задач, а также разработать обширный список требований к разрабатываемой системе с целью оптимизации работы оператора.

*Недостатки*: сложность и значительные затраты времени, обусловленные необходимостью глубокого понимания происходящих при выполнении задач когнитивных процессов, а также необходимостью проведения множественных интервью; в [Coffey et al., 2003, p. 48] отмечается, что данный метод не учитывает

возможность возникновения непредвиденных ситуаций и требует дополнительного проведения анализа MFTA.

### *Когнитивный анализ работы (Cognitive Work Analysis, CWA)*

Метод CWA разработан для анализа сложных социотехнических систем [Stanton et al., 2017, p. 4] и уделяет большое внимание среде, в которой выполняется задача. Когнитивный анализ работы предусматривает возможность применения разнообразных инструментов, таких как иерархические схемы, лестницы принятия решений, карты информационных потоков, а также структуры «навыки – правила – знания» [Vicente, 1999, p. 331-332]. Анализ состоит из этапов:

1. *Анализ рабочей среды:* отличие метода CWA от направленного на оператора подхода СТА заключается в том, что на этой стадии анализа оператор исключен из рассмотрения, а главной целью данного этапа является установление принципов и законов, определяющих функционирование среды;

2. *Анализ задач,* предполагающий стандартное разбиение задач на более мелкие (см. рис. 1);

3. *Анализ стратегий,* исследующий применение оператором различных стратегий поведения при решении задач, а также их взаимосвязь с такими определяющими функционирование системы внешними условиями, как уровень рабочей нагрузки оператора, количество доступной информации и т. д.;

4. *Анализ социальной организации,* направленный на выявление общественных и организационных ограничений деятельности оператора;

5. *Анализ компетенции работников,* проводящийся в целях исследования требований к операторам разрабатываемой системы: по результатам анализа составляется таблица с описанием ожидаемых навыков оператора, а также правил их работы в составе системы.

*Достоинства:* в рамках концепции CWA создано множество различных методов, гарантирующих всесторонность и комплексность проводимого анализа [Naikar, 2006, p. 436]; метод предполагает разработку требований не только к создаваемой системе, но и к подготовке и компетентности человека-оператора.

*Недостатки:* метод CWA подразумевает работу с достаточно большим количеством данных, что затрудняет процесс анализа и значительно увеличивает сроки его проведения; проведение анализа часто предполагает осуществление междисциплинарной работы, что предъявляет дополнительные требования к квалификации проводящих его экспертов [Rasmussen, 1983, p. 260].

Используемые в настоящей работе общие методы анализа и синтеза включают в себя:

1. Метод расчленения, применение которого позволило выделить наиболее существенные этапы каждого из рассмотренных способов анализа сложных систем, а также связи между ними с целью упрощения объектов исследования и выявления общих принципов и закономерностей их создания;

2. Морфологический анализ, используемый для определения оптимального варианта решения системы путем комбинирования разновидностей исполнения ее элементов за счет построения двумерной морфологической матрицы, строки и столбцы которой заполняются

альтернативными вариантами структуры системы, и выбора лучшего из полученного массива решений;

3. Метод объединения и связанный с ним комплексный подход к изучению объекта исследования, наиболее полно реализованный в концепции Общей теории систем и позволяющий объединить наиболее важные структурные элементы рассматриваемых способов анализа в единую систему.

К основным принципам Общей теории систем относят *системность*, выражающуюся в целостности полученной в результате применения метода объединения системы, и *универсальность*, позволяющую распространить результаты представленной работы по разработке обобщенного метода анализа авиационных систем MFTA/GDTA/CTA/CWA на другие области деятельности, тесно связанные с процессами принятия решений операторами в условиях динамически изменяющейся окружающей среды.

### Результаты (Results)

Из приведенного описания наиболее популярных аналитических методов создания АС можно сделать вывод, что все они имеют большое количество сходных черт и, в целом, направлены на определение цели, задач и подзадач разрабатываемой системы для обеспечения ее успешного взаимодействия с оператором. В табл. 1 приведены ключевые этапы проведения рассмотренных методов анализа.

Таблица 1 – Ключевые этапы аналитических методов анализа АС

| Метод                                   | MFTA | HTA | GDTA | CTA | CWA |
|-----------------------------------------|------|-----|------|-----|-----|
| Определение цели и задач                | +    | +   | +    | +   | +   |
| Определение функций оператора           | +    |     |      | +   | +   |
| Прогноз производительности              | +    |     |      |     |     |
| Требования ситуационной осведомленности |      |     | +    |     |     |
| Описание когнитивных процессов          |      |     |      | +   |     |
| Анализ среды                            |      |     |      |     | +   |

Выбор оптимального для анализа конкретной разрабатываемой АС метода может быть произведен на основе ограничений проекта по созданию адаптивной системы [Нои et al., 2014, р. 274]; эти ограничения включают в себя:

1. Ограничения бюджета: в зависимости от метода проведение анализа может оказаться дорогостоящим, либо затратным по времени;

2. Цель анализируемой системы: методы анализа могут быть разделены в зависимости от того, насколько они пригодны для использования при создании систем, нацеленных на выполнение простых, сложных или когнитивных (требующих принятия решений) заданий;

3. Тип анализа: в зависимости от сложности подготовки и осуществления методы анализа могут быть разделены на сложные и простые.

После определения существующих ограничений выбор метода анализа может быть определен по схеме, представленной на рис. 2. В качестве примера авторами были выбраны ограничения: 1) затраты по времени; 2) когнитивная задача; 3) простой способ анализа. Данные ограничения отражают особенности проекта по разработке авиационной АС, позволяющей осуществлять поддержку членов экипажа при принятии решений, группой из небольшого количества специалистов. Как видно из рис. 2, наиболее подходящим способом анализа в данном случае является метод СТА, однако могут быть также использованы такие способы проведения анализа, как MFTA, GDTA и CWA. Достоинства и недостатки данных методов приведены в табл. 2.

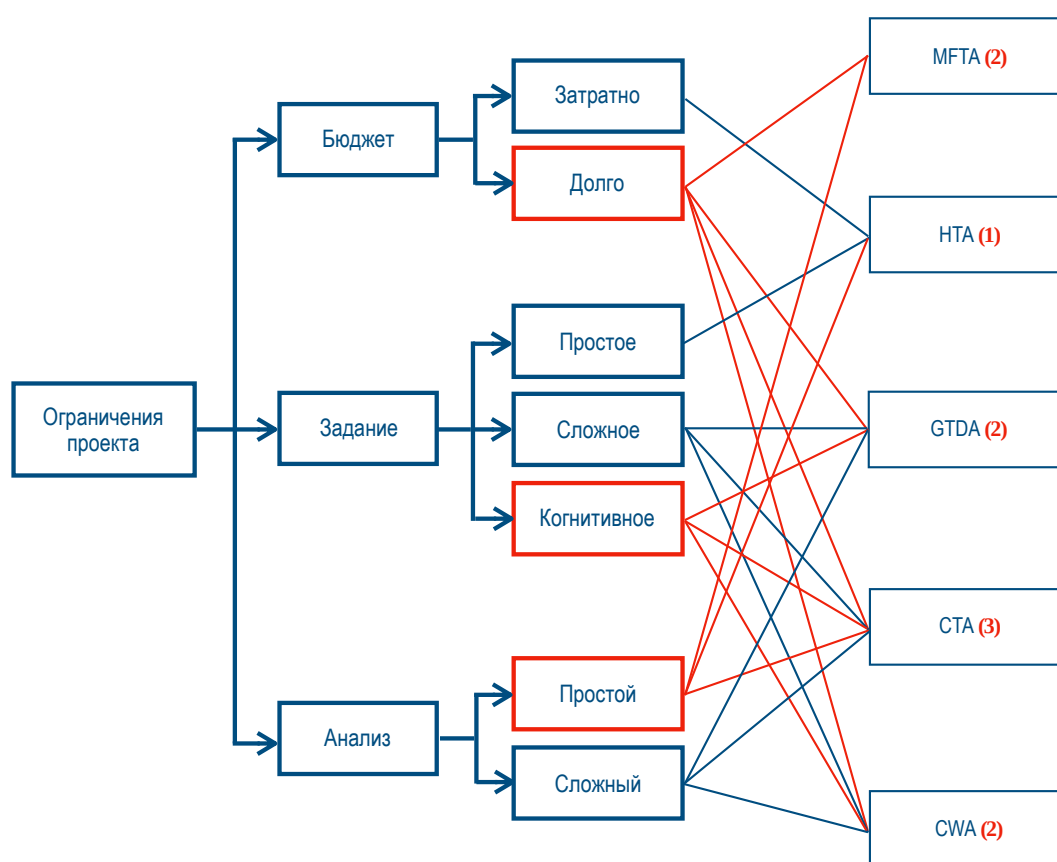


Рисунок 2 – Выбор метода создания АС. Источник:  
<https://doi.org/10.1109/icsmc.2005.1571518>

Таблица 2 – Достоинства и недостатки методов анализа

| Метод | Достоинства                                                                                                                                                                         | Недостатки                                                                                                                                             |
|-------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| MFTA  | 1. Может быть использован для разработки новой системы [Lamoureux et al., 2007, p. 296];<br>2. Используется систематический и последовательный подход [Brace et al., 2012, p. 901]; | 1. Осуществление анализа требует значительного предварительного обучения [Chow et al., 2006, p. 523];<br>2. Анализ сложной системы требует тщательного |

|      |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |                                                                                                                                                                                                                                          |
|------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|      | 3. Обеспечивает возможность прогнозирования производительности.                                                                                                                                                                                                                                                  | рассмотрения большого количества задач и может занять длительное время [Bernier et al., 2014, p. 18].                                                                                                                                    |
| GDТА | 1. Позволяет определить условия обеспечения ситуационной осведомленности оператора [Endsley et al., 2003, p. 270; Stanton, 2016, p. 6].                                                                                                                                                                          | 1. Не предусматривает определения четкой последовательности выполнения задач оператором и распределения функций в системе.                                                                                                               |
| СТА  | 1. Определяет обширный перечень когнитивных требований к оператору [Chipman et al., 2000, p. 34; Van Merriënboer et al., 2002, p. 44];<br>2. Позволяет четко определить возможные трудности функционирования системы, на которые разработчикам необходимо обратить особое внимание [Clark et al., 2008, p. 588]. | 1. Сложность и значительные затраты по времени [Coffey et al., 2003, p. 50];<br>2. Не учитывает возможность возникновения непредвиденных ситуаций и часто требует дополнительного применения метода MFTA [Crandal et al., 2006, p. 181]. |
| CWA  | 1. Включает комплексный анализ среды [Stanton et al., 2017, p. 56-57];<br>2. Подразумевает разработку требований к операторам [Vicente, 1999, p. 332];<br>3. Разнообразие существующих инструментов анализа гарантирует всесторонность и комплексность его проведения [Naikar, 2006, p. 436].                    | 1. Сложность проведения и значительные затраты по времени [Rasmussen, 1983, p. 260];<br>2. Значительные требования к квалификации и подготовке экспертов [Rasmussen, 1983, p. 260].                                                      |

Как видно из табл. 2, для многих из рассматриваемых способов анализа недостатки одного из них могут быть скомпенсированы достоинствами другого, что позволяет обосновать целесообразность создания и применения при разработке авиационных АС обобщенного метода MFTA/GDТА/СТА/CWA, объединяющего в себе различные подходы к проведению анализа: 1) MFTA является структурной основой предлагаемого метода; 2) GDТА позволяет определить требования по обеспечению ситуационной осведомленности оператора; 3) СТА и CWA применяются совместно для комплексного анализа внешних и внутренних условий, обуславливающих работу АС.

Проведение предлагаемого обобщенного метода состоит из трех этапов:

1. *Анализ цели и задач* (MFTA):

а) *Анализ цели*: определяется цель функционирования разрабатываемой АС, а также возможные ограничения по ее достижению. По результатам данного этапа создается *составной сценарий работы* [Tourki et al.,

2013, р. 13-16], отражающий общий порядок функционирования АС и ее взаимодействия с оператором и использующийся в качестве основы для дальнейшего анализа;

б) *Анализ задач*: определяются основные задачи, без выполнения которых достижение цели функционирования системы не представляется возможным. По результатам данного этапа создается *перечень основных задач системы*, определяющий последовательность их выполнения;

2. *Анализ подзадач и требований по обеспечению ситуационной осведомленности (MFTA и GDTA)*:

а) *Анализ подзадач и распределение функций*: определяются подзадачи системы, а также порядок распределения функций между оператором и автоматикой. По результатам данного этапа создается полная структурная схема разрабатываемой системы, определяющая последовательность конкретных действий для достижения общей цели работы АС;

б) *Анализ требований по обеспечению ситуационной осведомленности*: определяются данные, необходимые оператору и (или) системе для качественного выполнения каждой из подзадач;

3. *Когнитивный анализ (СТА и CWA)*:

а) *Анализ критических этапов*: определяются такие этапы функционирования системы, правильное и своевременное выполнение которых оказывает непосредственное влияние на такие основополагающие аспекты ее работы, как безопасность, надежность, стоимость и эффективность выполнения задачи, а также сама возможность достижения поставленной цели;

б) *Определение неблагоприятных внешних условий*, обуславливающих возможные трудности на каждом из критических этапов работы системы. Основываясь на анализе авиационных катастроф и инцидентов [Wiegmann et al., 2017, р. 45], были выявлены следующие негативные внешние условия, влияющие на наиболее важные аспекты функционирования авиационных АС:

1) условия неопределенности, когда имеющейся у оператора информации недостаточно для удовлетворения требованиям обеспечения ситуационной осведомленности;

2) сложность задачи, определяющая сложность когнитивных процессов, лежащих в основе деятельности оператора;

3) уровень рабочей нагрузки, определяющий текущие психофизиологическое состояние оператора и, как следствие, необходимость адаптации со стороны автоматики;

4) уровень психологического давления на оператора, вызванного осознанием последствий неверных действий;

5) другие факторы внешней среды, такие как наличие ограничений по времени, неблагоприятные метеорологические условия выполнения полета, условия на рабочем месте, подверженность пилота вредным воздействиям окружающей среды и т. д., требующие индивидуальной оценки в зависимости от специфики выполняемой задачи;

в) *Определение внутренних (когнитивных) уязвимостей системы*, связанных с возможностями и ограничениями человека-оператора как элемента АС. Основываясь на анализе исследований в области человеческого фактора в авиации [Котик, 1978, с. 172; Цибулевский, 1979, с. 96; Kelly et al., 2019, p. 159; Salas et al., 2010, p. 10], можно выделить следующие из них, оказывающие наибольшее влияние на процесс функционирования АС:

1) ограниченный объем и концентрация внимания, включая возможность таких состояний, как рассеянность, невнимательность, снижение бдительности и туннельное зрение;

2) ограниченный объем памяти, включая особенности организации кратковременной и долговременной памяти оператора;

3) сравнительная непродолжительность состояния сосредоточенности, являющаяся ограничением для выполнения функций по контролю работы авиационной автоматики;

4) предубеждения при принятии решений, включая предвзятость и возможность применения эвристического подхода к принятию решений;

5) особенности управления рабочей нагрузкой, отрицательно влияющие на деятельность оператора при необходимости управления несколькими задачами одновременно и т. д.;

г) *Анализ возможных рисков при выполнении когнитивных задач*: определяются риски, возникающие в тех случаях, когда какие-либо негативные внешние условия оказывают чрезмерно интенсивное воздействие на внутренние уязвимости системы, а также определяются возможные последствия таких рисков для создаваемой АС и пути их предотвращения. По результатам данного этапа строится *схема когнитивного анализа*: для каждого этапа, выбранного в качестве критического, устанавливается связь между внешними условиями, отрицательно влияющими на функционирование системы, и конкретными внутренними уязвимостями ее функционирования. Создание схемы когнитивного анализа способствует определению наиболее вероятных ошибок работы оператора на каждом критическом этапе, что позволяет подобрать соответствующие условия работы машинной составляющей АС для оказания эффективной помощи оператору. Пример такой схемы приведен на рис. 3: схема когнитивного анализа позволяет определить, что для рассматриваемого примера наиболее значимым неблагоприятным внешним условием работы системы является сложность задачи, а наиболее вероятные ошибки оператора могут быть связаны с решением нескольких задач одновременно.

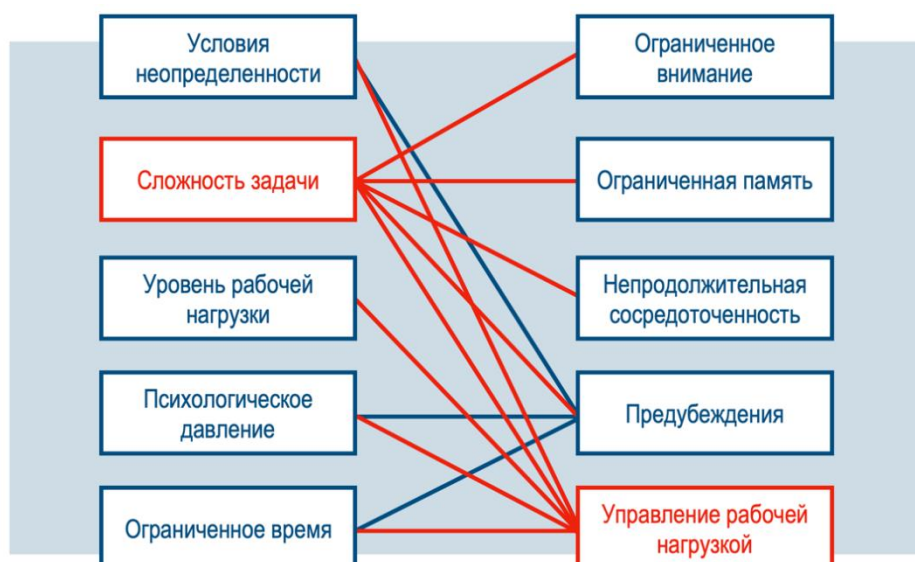


Рисунок 3 – Пример схемы когнитивного анализа

### Обсуждение (Discussion)

Представленный в настоящей работе результат не является первой попыткой объединения различных методов анализа с целью осуществления комплексной оценки сложных систем. Так, в рамках реализации проекта по созданию интеллектуальной адаптивной системы, обеспечивающей управление группой из нескольких беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) (UAV Control Interface project), был разработан «Гибридный метод анализа MFTA/GDTA/СТА» [Hou et al., 2005, p. 2466], объединяющий в себе указанные подходы к анализу авиационных АС. Результаты эксперимента [Hou et al., 2007, p. 343-344], проведенного для оценки эффективности созданной системы, показали, что ее использование позволяет сократить время выполнения операторами задач и повысить уровень их ситуационной осведомленности.

Целью рассматриваемого проекта являлось создание технологии, позволяющей снизить высокую рабочую нагрузку оператора, вызванную одновременным управлением несколькими БПЛА, что и определило специфику разрабатываемого для его реализации метода анализа: преимущество такого способа оценки условий функционирования АС заключается в том, что особое внимание уделяется проблеме распределения задач между операторам БПЛА и автоматикой для снижения возможных ошибок, связанных с ограниченными объемом и концентрацией внимания человека (посредством применения анализа СТА), а также вопросу обеспечения ситуационной осведомленности оператора (посредством применения анализа GDTA).

Указанные аспекты функционирования человека-оператора, как элемента АС, действительно играют важную роль для обеспечения безопасности полетов, однако в данном вопросе необходимо учитывать особенности окружающей среды, в которой осуществляется работа оператора БПЛА: находясь вне управляемого им летательного аппарата, человек не подвержен влиянию факторов среды, оказывающих непосредственное и часто определяющее воздействие на членов экипажа пилотируемого ВС.

К факторам, влияющим на работоспособность членов летного экипажа, можно отнести метеорологические условия выполнения полета, условия на рабочем месте, бароактустические, связанные с перепадами атмосферного давления, механические, радиационные, в том числе вызванные ионизирующими и радиочастотными излучениями, электромагнитные и химические условия. Отмечаются следующие особенности воздействия внешних факторов на пилотов ВС при выполнении ими полета:

1. Часто ошибки при пилотировании возникают в результате невозможности человека-оператора справиться с повышенной интенсивностью информации, поступающей из окружающей среды [Yeh et al., 1988, p. 114];

2. Большое влияние на уровни стресса и рабочей нагрузки пилота оказывают метеорологические условия, в которых выполняется полет [Johnson et al., 2015, p. 74], а наличие таких опасных факторов внешней среды, как турбулентность, обледенение, очаги грозовой деятельности, осадки и конвективная активность в атмосфере, могут в значительной мере ухудшить эффективность деятельности членов экипажа;

3. Непосредственное влияние на безопасность полетов оказывают летное утомление, высотная и воздушная болезни, возможность воздействия на пилота угарного газа, подверженность человека летным иллюзиям;

4. Особый характер летного труда определяется высокой вероятностью появления в полете состояния дезинтеграции отражательной функции психики; это происходит из-за рассогласования в работе анализаторных систем, нарушения баланса между сознательной и подсознательной сферами, а также феномена «обмана чувств» [Пономаренко и др., 2017, с. 88]: так, дезориентация пилота является одной из распространенных причин авиационных происшествий;

5. Результаты эксперимента [Stave, 1977, p. 512], в котором изучалась зависимость психофизиологических показателей деятельности членов экипажа от таких условий внешней среды, как шум и вибрация, показали, что производительность пилотов напрямую определяется изменением интенсивности этих внешних воздействий.

Все это указывает на то, что внешние факторы оказывают непосредственное влияние на психофизиологические показатели деятельности членов экипажа пилотируемых ВС в полете, что обуславливает необходимость их учета при разработке авиационных адаптивных систем.

Проведение предлагаемого обобщенного метода анализа MFTA/GDTA/СТА/CWA не только сосредоточено на обеспечении ситуационной осведомленности пилотов при эксплуатации ими адаптивной автоматики ВС, но также позволяет оценить возможные риски, определяемые как внешней средой функционирования системы, так и ее внутренними (когнитивными) уязвимостями. Такой подход имеет ряд преимуществ по сравнению с другими распространенными методами анализа, что обуславливает перспективы его применения при разработке авиационных АС, предназначенных для использования на пилотируемых ВС гражданской авиации:

1. Во-первых, перечень рассматриваемых на этапе когнитивного анализа неблагоприятных внешних условий работы системы основан на анализе причин авиационных происшествий [Wiegmann et al., 2017, p. 45], предпосылки которых связаны с негативным влиянием человеческого фактора на функционирование авиационно-транспортной системы, что подтверждает обоснованность выбора указанных отрицательных факторов. С другой стороны, данный перечень, как и список внутренних уязвимостей системы, не является исчерпывающим: предлагаемый подход к анализу возможных рисков при выполнении оператором когнитивных задач сам по себе является эффективным инструментом разработки АС, а его параметры могут быть адаптированы для конкретной разрабатываемой системы на основе ее особенностей;

2. Во-вторых, процедура анализа возможных рисков при выполнении когнитивных задач осуществляется для каждого из определенных для конкретной АС критических этапов ее функционирования: такой подход способствует определению причин наиболее вероятных ошибок оператора на каждом этапе работы АС, что позволяет подобрать оптимальный диапазон адаптации [Endsley et al., 1999, p. 479], а также наиболее эффективный способ поддержки экипажа ВС со стороны системы;

3. В-третьих, определяемые с использованием предлагаемого метода анализа требования к функционированию системы вытекают из четкого определения цели и задач работы АС, функций оператора (благодаря использованию анализа MFTA), а также из условий обеспечения ситуационной осведомленности пилотов (благодаря использованию анализа GDTA);

4. В-четвертых, предлагаемый обобщенный метод анализа MFTA/GDTA/CTA/CWA учитывает возможные финансовые и другие ограничения проекта по разработке АС (см. рис. 2).

### **Заключение (Conclusion)**

Таким образом, на основе изложенного можно сделать следующие выводы о проведенном исследовании в области разработки обобщенного метода анализа MFTA/GDTA/CTA/CWA для создания авиационных АС:

1. Возможности человека-оператора, как элемента ЧМС, ограничены и часто не соответствуют возможностям современной техники; использование в человеко-машинных системах автоматики призвано оказать человеку эффективную помощь при взаимодействии с технически сложной машиной. Создание АС является одним из перспективных направлений в области разработки авиационной автоматики: АС обладают экспериментально доказанными преимуществами по сравнению с традиционными системами, а их применение позволяет снизить рабочую нагрузку оператора и увеличить его производительность, и в то же время не способствует исключению пилота из контура управления, оказывая благоприятное влияние на уровень его ситуационной осведомленности и сохранение навыков ручного пилотирования.

2. Существуют разнообразные аналитические методы разработки АС: они направлены на изучение различных аспектов их функционирования с целью выявления индивидуальных особенностей конкретной системы; к наиболее

популярным из них относятся методы MFTA, НТА, GDTA, СТА и CWA. В работе описаны основные принципы применения указанных аналитических подходов к созданию АС, а также произведен сравнительный анализ, позволивший выявить их основные преимущества и недостатки (см. табл. 1 и табл. 2). Из описания методов следует, что все они имеют большое количество сходных черт, а недостатки одного из них могут быть скомпенсированы достоинствами другого, что позволяет обосновать целесообразность применения предлагаемого обобщенного метода анализа.

3. Обобщенный метод MFTA/GDTA/СТА/CWA предназначен для разработки авиационных АС и объединяет в себе различные подходы к проведению анализа: 1) MFTA является структурной основой предлагаемого метода; 2) GDTA позволяет определить требования по обеспечению ситуационной осведомленности оператора; 3) СТА и CWA применяются совместно для комплексного анализа внешних и внутренних условий работы АС. Наиболее важным этапом проведения анализа с использованием предлагаемого метода является анализ возможных рисков при выполнении когнитивных задач оператором, предполагающий создание схемы когнитивного анализа (см. рис. 3): ее разработка способствует определению наиболее вероятных ошибок оператора на каждом критическом этапе функционирования системы, что позволяет подобрать соответствующие условия работы машинной составляющей АС для оказания эффективной помощи человеку.

4. Одно из главных преимуществ предлагаемого метода, обуславливающее перспективность его применения, заключается в том, что его проведение не только сосредоточено на обеспечении ситуационной осведомленности пилотов при эксплуатации ими адаптивной автоматики ВС, но также позволяет оценить возможные риски, вызванные внешней средой функционирования системы. Кроме того, предлагаемый обобщенный метод учитывает возможные финансовые и другие ограничения проекта по созданию АС. К другим достоинствам предлагаемого метода относятся: 1) возможность адаптировать параметры метода в зависимости от особенностей разрабатываемой системы; 2) возможность подобрать оптимальный уровень адаптации АС, а также наиболее эффективный способ поддержки экипажа ВС со стороны автоматики благодаря определению наиболее вероятных ошибок оператора на каждом критическом этапе работы системы с использованием элементов анализа СТА и CWA; 3) использование элементов анализа MFTA и GDTA позволяет четко определить цель и задачи работы АС и функции человека-оператора, а также требования по обеспечению ситуационной осведомленности членов экипажа на всех этапах их взаимодействия с системой.

### **Библиографический список**

*Коваленко Г. В.* Анализ состояния аварийности современной авиации в Российской Федерации / Г. В. Коваленко, И. С. Муравьев, С. Г. Нуждин // Вестник Санкт-Петербургского государственного университета гражданской авиации. 2017. № 2(15). С. 26-36. EDN YSZLVZ.  
*Коваленко Г. В.* Неудовлетворительное взаимодействие между элементами интеллектуальной адаптивной системы ВС, как одна из основных причин катастрофы Boeing 737 MAX8 авиакомпании Ethiopian Airlines / Г. В. Коваленко, Ю. Ю. Михальчевский, И. А. Ядров //

- Вестник Санкт-Петербургского государственного университета гражданской авиации. 2022. № 4(37). С. 5-18. EDN UXHYBZ.
- Котик М. А. Курс инженерной психологии. 2-е изд., испр. и доп. Таллин: Валгус, 1978. 374 с.
- Пономаренко В. А. Смысл авиации 5-го поколения / В. А. Пономаренко, С. А. Айвазян. М.: Когито-центр, 2017. 278 с.
- Цибулевский И. Е. Ошибочные реакции человека-оператора. М.: Сов. Радио, 1979. 208 с.
- Ядров И. А. Потенциал применения интеллектуальных адаптивных систем поддержки принятия решений в авиации // Молодежный исследовательский потенциал 2023: Сборник статей Международного научно-исследовательского конкурса. Петрозаводск: МЦНП «Новая наука», 2023. С. 152-163. EDN JKDHLX.
- Ядров И. А. Разработка алгоритма по определению оптимального способа обхода грозового очага воздушным судном // Лучшая исследовательская работа 2022: Сборник статей IV Международного научно-исследовательского конкурса. Петрозаводск: МЦНП «Новая наука», 2022. С. 181-191. EDN IHTWCU.
- Annette J. Research and developments in task analysis / J. Annette, N. A. Stanton // *Ergonomics*. 1998. Vol. 41. P. 1529-1536.
- Annette J. Task analysis and training design / J. Annette, K. Duncan // *Journal of Occupational Psychology*. 1967. Vol. 41. P. 211-221.
- Bernier M. Mission Function Task Analysis for Cyber Defence / M. Bernier, K. Perrett. Defence Research and Development Canada Ottawa, Ontario Canada, 2014. 20 p.
- Bibby K. S. Man's role in control systems // *IFAC Proceedings Volumes*. 1975. Vol. 8, № 1. P. 664-683. DOI: 10.1016/S1474-6670(17)67612-2.
- Billings C. E. Aviation automation: The search for a human-centered approach. CRC Press, 2018. 370 p.
- Bolstad C. A. Using goal directed task analysis with Army brigade officer teams / C. A. Bolstad, J. M. Riley // *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting*. Los Angeles, CA: SAGE Publications, 2002. Vol. 46. № 3. P. 472-476. DOI: 10.1177/154193120204600354.
- Brace W. A framework to support requirements analysis in engineering design / W. Brace, V. Cheutet // *Journal of Engineering Design*. 2012. Vol. 23. № 12. P. 876-904. DOI: 10.1080/09544828.2011.636735.
- Chipman S. F. Introduction to cognitive task analysis / S. F. Chipman, J. M. Schraagen, V. L. Shalin // *Cognitive task analysis*. Psychology Press, 2000. P. 17-38.
- Chow R. Applied comparison between hierarchical goal analysis and mission, function and task analysis / R. Chow, B. Kobierski, C. Coates // *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting*. Los Angeles, CA: SAGE Publications, 2006. Vol. 50. № 3. P. 520-524. DOI: 10.1177/154193120605000365.
- Clark R. E. Cognitive task analysis / R. E. Clark, D. F. Feldon, J. J. G. Van Merriënboer // *Handbook of research on educational communications and technology*. Routledge, 2008. P. 577-593.
- Coffey J. W. Knowledge modeling for the preservation of institutional memory / J. W. Coffey, R. R. Hoffman // *Journal of Knowledge Management*. 2003. Vol. 7. № 4. P. 38-52. DOI: 10.1108/13673270310485613.
- Crandall B. Working minds: A practitioner's guide to cognitive task analysis / B. Crandall, G. A. Klein, R. R. Hoffman. Mit Press, 2006. 352 p.
- Cummings M. L. Automation bias in intelligent time critical decision support systems // *Decision making in aviation*. Routledge, 2017. P. 289-294. DOI: 10.2514/6.2004-6313.
- Endsley M. R. Level of automation effects on performance, situation awareness and workload in a dynamic control task / M. R. Endsley, D. B. Kaber // *Ergonomics*. 1999. Vol. 42, № 3. P. 462-492. DOI: 10.1080/001401399185595.
- Endsley M. R. Situation awareness oriented design: from user's cognitive requirements to creating effective supporting technologies / M. R. Endsley, C. A. Bolstad, D. G. Jones // *Proceedings of the*

Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting. Los Angeles, CA: SAGE Publications, 2003. Vol. 47. № 3. P. 268-272. DOI: 10.1177/154193120304700304.

*Hou M.* Intelligent adaptive interfaces for the control of multiple UAVs / M. Hou, R. D. Kobierski, M. Brown // *Journal of Cognitive Engineering and Decision Making*. 2007. Vol. 1, № 3. P. 327-362. DOI: 10.1518/155534307X255654.

*Hou M.* Intelligent adaptive systems: An interaction-centered design perspective / M. Hou, S. Banbury, C. Burns. CRC Press, 2014. 336 p.

*Hou M.* Performance modeling of agent-aided operator-interface interaction for the control of multiple UAVs / M. Hou, R. D. Kobierski // 2005 IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics. IEEE, 2005. P. 2463-2468. DOI: 10.1109/ICSMC.2005.1571518.

*Johnson C. M.* VFR into IMC: Using simulation to improve weather-related decision-making / C. M. Johnson, D. A. Wiegmann // *The International Journal of Aviation Psychology*. 2015. Vol. 25. № 2. P. 63-76. DOI: 10.1080/10508414.2015.1026672.

*Kaber D. B.* The effects of level of automation and adaptive automation on human performance, situation awareness and workload in a dynamic control task / D. B. Kaber, M. R. Endsley // *Theoretical issues in ergonomics science*. 2004. Vol. 5. № 2. P. 113-153. DOI: 10.1080/1463922021000054335.

*Kelly D.* An analysis of human factors in fifty controlled flight into terrain aviation accidents from 2007 to 2017 / D. Kelly, M. Efthymiou // *Journal of safety research*. 2019. Vol. 69. P. 155-165. DOI: 10.1016/j.jsr.2019.03.009.

*Lamoureux T.* Two methods for control task analysis / T. Lamoureux, J. Sartori // *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting*. Sage CA: Los Angeles, CA: SAGE Publications, 2007. Vol. 51. № 4. P. 293-297. DOI: 10.1177/154193120705100431.

*Lee J. Y.* Formative research on the heuristic task analysis process / J. Y. Lee, C. M. Reigeluth // *Educational Technology Research and Development*. 2003. Vol. 51. № 4. P. 5-17. DOI: 10.1007/BF02504541.

*Militello L.* Applied cognitive task analysis (ACTA): a practitioner's toolkit for understanding cognitive task demands / L. Militello, R. Hutton // *Ergonomics*. 1998. Vol. 41. № 11. P. 1618-1641. DOI: 10.1080/001401398186108.

*Naikar N.* Beyond interface design: Further applications of cognitive work analysis // *International journal of industrial ergonomics*. 2006. Vol. 36. № 5. P. 423-438. DOI: 10.1016/j.ergon.2006.01.006.

*Onnasch L.* Human performance consequences of stages and levels of automation: An integrated meta-analysis // *Human factor*. 2014. Vol. 56. № 3. P. 476-488. DOI: 10.1177/0018720813501549.

*Parasuraman R.* Adaptive aiding and adaptive task allocation enhance human-machine interaction / R. Parasuraman, M. Mouloua, B. Hilburn // *Automation technology and human performance: Current research and trends*. 1999. P. 119-123.

*Parasuraman R.* A model for types and levels of human interaction with automation / R. Parasuraman, T. Sheridan, C. A. Wickens // *IEEE Transactions on systems, man, and cybernetics. Part A: Systems and Humans*. 2000. Vol. 30, № 3. P. 286-297. DOI: 10.1109/3468.844354.

*Rasmussen J.* Skills, rules and knowledge: signals, signs, and symbols, and other distinctions in human performance models // *IEEE transactions on systems, man, and cybernetics*. 1983. Vol. 13. P. 257-266. DOI: 10.1109/TSMC.1983.6313160.

*Salas E.* Human factors in aviation: an overview / E. Salas, D. Maurino, M. Curtis // *Human factors in aviation*. 2010. P. 3-19. DOI: 10.1016/B978-0-12-374518-7.00001-8.

*Stanton N. A.* Application of cognitive work analysis to system analysis and design / N. A. Stanton, D. P. Jenkins // *Cognitive Work Analysis*. CRC Press, 2017. P. 3-72. DOI: 10.1201/9781315572536-2.

*Stanton N. A.* Distributed situation awareness // *Theoretical Issues in Ergonomics Science*. 2016. Vol. 17. № 1. P. 1-7. DOI: 10.1080/1463922X.2015.1106615.

*Stanton N. A.* Hierarchical task analysis: Developments, applications, and extensions // *Applied ergonomics*. 2006. Vol. 37. № 1. P. 55-79. DOI: 10.1016/j.apergo.2005.06.003.

Stave A. M. The effects of cockpit environment on long-term pilot performance // *Human Factors*. 1977. Vol. 19. № 5. P. 503-514. DOI: 10.1177/001872087701900506.

Taylor R. M. Cognitive cockpit systems: Information requirements analysis for pilot control of cockpit automation / R. M. Taylor, S. Abdi, R. Dru-Drury // *Engineering Psychology and Cognitive Ergonomics Volume Five*. Routledge, 2017. P. 81-88.

Tourki Y. Scenario analysis: a review of methods and applications for engineering and environmental systems / Y. Tourki, J. Keisler, I. Linkov // *Environment Systems & Decisions*. 2013. Vol. 33. P. 3-20. DOI: 10.1007/s10669-013-9437-6.

Van Merriënboer J. J. G. Blueprints for complex learning: The 4C/ID-model / J. J. G. Van Merriënboer, R. E. Clark, M. De Croock // *Educational technology research and development*. 2002. Vol. 50. № 2. P. 39-61. DOI: 10.1007/BF02504993.

Vicente K. J. *Cognitive Work Analysis: Toward safe, productive, and healthy computer-based work*. CRC press, 1999. 416 p.

Wickens C. D. *Automation and human performance* // *Engineering Psychology and Human Performance* 4th Edition. Boston, MA: Pearson, 2012. P. 377-404.

Wiegmann D. A. A human error approach to aviation accident analysis: The human factors analysis and classification system / D. A. Wiegmann, S. A. Shappell. Routledge, 2017. 184 p.

Yeh Y. Y. Dissociation of performance and subjective measures of workload / Y. Y. Yeh, C. D. Wickens // *Human factors*. 1988. Vol. 30. № 1. P. 111-120. DOI: 10.1177/0018720888030001.

## References

Annette J., Duncan K. (1967). Task analysis and training design. *Journal of Occupational Psychology*. 41: 211-221.

Annette J., Stanton A. (1998). Research and developments in task analysis. *Ergonomics*. 41: 1529-1536.

Bernier M., Perrett K. (2014). Mission Function Task Analysis for Cyber Defence. Defence Research and Development Canada Ottawa, Ontario Canada. 2014. 20 p.

Bibby K. S. (1975). Man's role in control systems. *IFAC Proceedings Volumes*. 8(1): 664-683. DOI: 10.1016/S1474-6670(17)67612-2.

Billings C. E. (2018). *Aviation automation: The search for a human-centered approach*. CRC Press. 2018. 370 p.

Bolstad C. A., Riley J. M. (2002). Using goal directed task analysis with Army brigade officer teams. *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting*. Los Angeles, CA: SAGE Publications. 46(3): 472-476. DOI: 10.1177/154193120204600354.

Brace W., Cheutet V. A framework to support requirements analysis in engineering design. *Journal of Engineering Design*. 23(12): 876-904. DOI: 10.1080/09544828.2011.636735.

Chipman S. F., Schraagen J. M., Shalin V. L. (2000). Introduction to cognitive task analysis. *Cognitive task analysis*. Psychology Press. 17-38.

Chow R., Kobierski B., Coates C. (2006). Applied comparison between hierarchical goal analysis and mission, function and task analysis. *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting*. Los Angeles, CA: SAGE Publications. 50(3): 520-524. DOI: 10.1177/154193120605000365.

Clark R. E., Feldon D. F., Van Merriënboer J. J. G. (2008). Cognitive task analysis. *Handbook of research on educational communications and technology*. Routledge. 577-593.

Coffey J. W., Hoffman R. R. (2003). Knowledge modeling for the preservation of institutional memory. *Journal of Knowledge Management*. 7(4): 38-52. DOI: 10.1108/13673270310485613.

Crandall B., Klein G. A., Hoffman R. R. (2006). *Working minds: A practitioner's guide to cognitive task analysis*. Mit Press. 2006. 352 p.

Cummings M. L. (2017) Automation bias in intelligent time critical decision support systems. *Decision making in aviation*. Routledge. 289-294. DOI: 10.2514/6.2004-6313.

Endsley M. R., Bolstad C. A., Jones D. G. (2003). Situation awareness oriented design: from user's cognitive requirements to creating effective supporting technologies. *Proceedings of the Human*

*Factors and Ergonomics Society Annual Meeting*. Los Angeles, CA: SAGE Publications. 47(3): 268-272. DOI: 10.1177/154193120304700304.

Endsley M. R., Kaber D. B. (1999). Level of automation effects on performance, situation awareness and workload in a dynamic control task. *Ergonomics*. 42(3): 462-492. DOI: 10.1080/0014013991855595.

Hou M., Banbury S., Burns C. (2014). Intelligent adaptive systems: An interaction-centered design perspective. *CRC Press*. 2014. 336 p.

Hou M., Kobierski R. D. (2005). Performance modeling of agent-aided operator-interface interaction for the control of multiple UAVs. *2005 IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics*. 2463-2468. DOI: 10.1109/ICSMC.2005.1571518.

Hou M., Kobierski R. D., Brown M. (2007). Intelligent adaptive interfaces for the control of multiple UAVs. *Journal of Cognitive Engineering and Decision Making*. 1(3): 327-362. DOI: 10.1518/155534307X255654.

Johnson C. M., Wiegmann D. A. (2015). VFR into IMC: Using simulation to improve weather-related decision-making. *The International Journal of Aviation Psychology*. 25(2): 63-76. DOI: 10.1080/10508414.2015.1026672.

Kaber D. B., Endsley M. R. (2004). The effects of level of automation and adaptive automation on human performance, situation awareness and workload in a dynamic control task. *Theoretical issues in ergonomics science*. 5(2): 113-153. DOI: 10.1080/1463922021000054335.

Kelly D., Efthymiou M. (2019). An analysis of human factors in fifty controlled flight into terrain aviation accidents from 2007 to 2017. *Journal of safety research*. 69: 155-165. DOI: 10.1016/j.jsr.2019.03.009.

Kotik M. A. (1978). The course on Engineering Psychology [*Kurs inzhenernoy psihologii*]. Tellin: Valgus. 1978. 374 p. (In Russian)

Kovalenko G. V., Mikhal'chevskiy Y. Y., Yadrov I. A. (2022). Unsatisfactory interaction between the elements of the intelligent adaptive system of the aircraft, as one of the main causes of the Ethiopian Airlines Boeing 737 MAX8 accident [Neudovletvoritel'noye vzaimodeystvie mezhdu elementami intellektual'noy adaptivnoy sistemi VS kak odna iz osnovnih prichin katastrofi Boeing 737 MAX8 aviakompanii Ethiopian Airlines]. *Vestnik Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo universiteta grazhdanskoy aviatsii* [St. Petersburg University of Civil Aviation's Journal]. 4(37): 5-18. EDN UXHYBZ (In Russian)

Kovalenko G. V., Muravyev I. S., Nuzhdin S. G. (2017). Analysis of the state of air safety in modern aviation in the Russian Federation [Analiz sostoyaniya avariynosti sovremennoy aviatsii v Rossiyskoy Federatsii]. *Vestnik Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo universiteta grazhdanskoy aviatsii* [St. Petersburg University of Civil Aviation's Journal]. 2(15): 26-35. EDN YSZLVZ. (In Russian)

Lamoureux T., Sartori J. (2007). Two methods for control task analysis. *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting*. Sage CA: Los Angeles, CA: SAGE Publications. 51(4): 293-297. DOI: 10.1177/154193120705100431.

Lee J. Y., Reigeluth C. M. (2003). Formative research on the heuristic task analysis process. *Educational Technology Research and Development*. 51(4): 5-17. DOI: 10.1007/BF02504541.

Militello L., Hutton R. (1998). Applied cognitive task analysis (ACTA): a practitioner's toolkit for understanding cognitive task demands. *Ergonomics*. 41(11): 1618-1641. DOI: 10.1080/001401398186108.

Naikar N. (2006). Beyond interface design: Further applications of cognitive work analysis. *International journal of industrial ergonomics*. 36(5): 423-438. DOI: 10.1016/j.ergon.2006.01.006.

Onnasch L. (2014). Human performance consequences of stages and levels of automation: An integrated meta-analysis. *Human factor*. 56(3): 476-488. DOI: 10.1177/0018720813501549.

Parasuraman R., Mouloua M., Hilburn B. (1999). Adaptive aiding and adaptive task allocation enhance human-machine interaction. *Automation technology and human performance: Current research and trends*. 119-123.

Parasuraman R., Sheridan T., Wickens C. (2000). A model for types and levels of human interaction with automation. *IEEE Transactions on systems, man, and cybernetics, part A: Systems and Humans*. 30(3): 286-297. DOI: 10.1109/3468.844354.

Ponomarenko V. A., Aivazian S. A. (2017). The meaning of 5th generation aviation [Smisl aviatsii 5-go pokoleniia]. Moscow: Kogito-centr. 2017. 278 p.

Rasmussen J. (1983). Skills, rules and knowledge: signals, signs, and symbols, and other distinctions in human performance models. *IEEE transactions on systems, man, and cybernetics*. 13: 257-266. DOI: 10.1109/TSMC.1983.6313160.

Salas E., Maurino D., Curtis M. (2010). Human factors in aviation: an overview. *Human factors in aviation*: 3-19. DOI: 10.1016/B978-0-12-374518-7.00001-8.

Stanton N. A. (2006). Hierarchical task analysis: Developments, applications, and extensions. *Applied ergonomics*. 37(1): 55-79. DOI: 10.1016/j.apergo.2005.06.003.

Stanton N. A. (2016). Distributed situation awareness. *Theoretical Issues in Ergonomics Science*. 17(1): 1-7. DOI: 10.1080/1463922X.2015.1106615.

Stanton N. A., Jenkins D. P. (2017). Application of cognitive work analysis to system analysis and design. *Cognitive Work Analysis*. CRC Press. 3-72. DOI: 10.1201/9781315572536-2.

Stave A. M. (1977). The effects of cockpit environment on long-term pilot performance. *Human Factors*. 19(5): 503-514. DOI: 10.1177/001872087701900506.

Taylor R. M., Abdi S., Dru-Drury R. (2017). Cognitive cockpit systems: Information requirements analysis for pilot control of cockpit automation. *Engineering Psychology and Cognitive Ergonomics Volume Five*. Routledge: 81-88.

Tourki Y., Keisler J., Linkov I. (2013). Scenario analysis: a review of methods and applications for engineering and environmental systems. *Environment Systems & Decisions*. 33: 3-20. DOI: 10.1007/s10669-013-9437-6.

Tsibulevsky I. E. (1979) Erroneous reactions of the human operator [Oshibochnie reakcii cheloveka-operatora]. Moscow: Sov. Radio. 1979. 208 p. (In Russian)

Van Merriënboer J. J. G., Clark R. E., De Crook M. (2002). Blueprints for complex learning: The 4C/ID-model. *Educational technology research and development*. 50(2): 39-61. DOI: 10.1007/BF02504993.

Vicente K. J. (1999). Cognitive Work Analysis: Toward safe, productive, and healthy computer-based work. CRC press. 1999. 416 p.

Wickens C. D. (2012). Automation and human performance. *Engineering Psychology and Human Performance 4th Edition*, Boston, MA: Pearson: 377-404.

Wiegmann D. A., Shappell S. A. (2017). A human error approach to aviation accident analysis: The human factors analysis and classification system. Routledge, 2017. 184 p.

Yadrov I. A. (2022). The algorithm for determining the optimal flight path for thunderstorm avoidance design [Razrabotka algoritma po opredeleniyu optimal'nogo sposoba obhoda grozovogo ochaga vozdushnim sudnom]. *Luchshaya issledovatel'skaya rabota 2022: Sbornik statey IV Mezhdunarodnogo nauchno-issledovatel'skogo konkursa* [Best research work 2022: Collection of articles of the IV International Research Competition]: 181-191. EDN IHTWCU. (In Russian)

Yadrov I. A. (2023). Intelligent adaptive decision support systems for flight crew decision-making application potential [Potencial primeneniia intellektualnih adaptivnih sistem podderzhki priniatiia reshenii v aviatsii]. *Molodezhnii issledovatel'skii potencial 2023: Sbornik statei Mezhdunarodnogo nauchno-issledovatel'skogo konkursa* [Youth Research Potential 2023: Collection of articles of the International Research Competition]: 152-163. EDN JKDHLX. (In Russian)

Yeh Y. Y., Wickens C. D. (1988). Dissociation of performance and subjective measures of workload. *Human factors*. 30(1): 111-120. DOI: 10.1177/0018720888030001.