

АНАЛИЗ ДАННЫХ | DATA ANALYSIS

Научная статья | Original paper

УДК 004.9:629.7.05

Методика системного проектирования человеко-машинного интерфейса авиационного многофункционального пульта управления

Э.Д. Глухова¹✉, А.Н. Анохин², Д.А. Зеркаленков¹

¹ ФАУ «Государственный научно-исследовательский институт авиационных систем»
Москва, Российская Федерация

² Акционерное общество «Росатом Автоматизированные системы управления»
Москва, Российская Федерация

✉ emma@greenfil.ru

Резюме

В статье представлена методика проектирования кадров многофункционального пульта управления, направленная на обеспечение единобразия интерфейсов при разработке независимыми специалистами. Поскольку кадры МФПУ часто проектируются несколькими независимыми разработчиками, отсутствие единого подхода приводит к несогласованности интерфейсов, что усложняет обучение пилотов, снижает эффективность их работы и может привести к проявлению опасного психофизиологического фактора негативного переноса. Предлагаемая методика основана на иерархическом анализе задач и включает этапы анализа функций, создания пользовательских историй, анализа задач экипажа, проектирования кадров, их отработки на имитаторе и формирования документации. Для проверки эффективности методики проведен эксперимент, в котором проводилось проектирование кадров МФПУ несколькими независимыми разработчиками. В результате было выявлено, что применение методики позволяет повысить единобразие кадровых структур с 84% до 98%. Также было проведено экспертное оценивание кадров по методу анализа иерархий Саати по критериям удобства навигации, скорости ввода данных и надежности работы оператора. В результате было выявлено, что кадры, разработанные по методике, имеют больший суммарный вес альтернативы с учетом весов критериев (0,83 для нового варианта и 0,17 для старого, разработанного без методики). Таким образом, применение методики позволяет повысить степень унификации интерфейсов и эргономические характеристики МФПУ.



Новизна работы также обусловлена методом выявления значимых различий в сходстве бинарных матриц внутри групп в случае малой выборки на основе перестановочного теста.

Ключевые слова: проектирование интерфейсов, стандартизация интерфейсов, иерархический анализ задач

Для цитирования: Глухова, Э.Д., Анохин, А.Н., Зеркаленков, Д.А. (2025). Методика системного проектирования человека-машинного интерфейса авиационного многофункционального пульта управления. *Моделирование и анализ данных*, 15(3), 7–26.
<https://doi.org/10.17759/mda.2025150301>

Systematic design methodology for the human-machine interface of an aviation multifunctional control panel

E.D. Glukhova¹✉, A.N. Anokhin², D.A. Zerkalenkov¹

¹ Federal Autonomous Institution “State Research Institute of Aviation Systems”

Moscow, Russian Federation

² Joint Stock Company “Rosatom Automated Control Systems”

Moscow, Russian Federation

✉ emma@greenfil.ru

Abstract

The article presents a methodology for designing frames of a multifunctional control panel, aimed at ensuring interface consistency when developed by independent specialists. Since these frames are often designed by multiple independent developers, the lack of a standardized approach leads to interface inconsistencies, complicating pilot training and reducing operational efficiency. The proposed methodology is based on hierarchical task analysis and includes stages such as function analysis, user story creation, task decomposition, frame design, simulator testing, and documentation generation.

An experiment was conducted to evaluate the methodology's effectiveness, involving independent developers designing control panel frames. The results demonstrated that the methodology increased frame structure uniformity from 84% to 98%. Expert evaluations using the Saaty hierarchy analysis method assessed criteria such as navigation ease, data entry speed, and operator reliability. The findings revealed that frames developed with the methodology had a higher total weighted score (0.83 for the new version versus 0.17 for the old version developed without the methodology). Thus, the methodology enhances interface consistency, promotes pilot training, and improves ergonomic characteristics of MCDU.

The study also introduces a novel permutation test-based method for identifying significant differences in binary matrix similarity within small sample groups.



Keywords: interface design, interface standardization, hierarchical task analysis

For citation: Glukhova, E.D., Anokhin, A.N., Zerkalenkov, D.A. (2025). Systematic design methodology for the human-Machine interface of an aviation multifunctional control panel. *Modelling and Data Analysis*, 15(3), 7—26. (In Russ.). <https://doi.org/10.17759/mda.2025150301>

Введение

Деятельность оператора в человеко-машинных системах (ЧМС) включает в себя сознательно регулируемые (произвольные) и автоматические (навыковые) компоненты (Козлов, 2024; Леонтьев, 1975; Ломов, 1982, Пономаренко, 1992).

На сознательном уровне оператор принимает осмысленные решения, анализирует информацию и планирует действия. На уровне навыков выполнение операций происходит автоматически, без значительных когнитивных затрат. При этом на начальных этапах обучения преобладает сознательный контроль, но по мере накопления опыта значительная часть действий переходит в категорию операций, выполняемых на навыках, что снижает когнитивную нагрузку и повышает скорость и надежность работы оператора.

Переход от осознанного контроля к автоматическому выполнению операций требует многократного повторения одних и тех же действий в стабильных условиях. В ходе обучения формируются **динамические стереотипы** — устойчивые паттерны реакций на типовые ситуации (Павлов, 1927).

В случае, когда ранее усвоенные стереотипы конфликтуют со вновь усваиваемыми, то есть, когда от оператора требуется различающееся поведение в существенно схожих ситуациях, освоение новых методов работы затрудняется. Кроме того, в стрессовой ситуации велика вероятность применения ранее усвоенного навыка. Этот феномен носит название «негативный перенос» и в авиации наиболее известен в применении к проблеме авиаориентации (Козлов, 2024).

Таким образом, **согласованность человека-машинного интерфейса** играет критическую роль в эффективном формировании навыков оператора, а также значительно влияет на надежность и эффективность его работы.

Стандартизирующие документы (ГОСТ, ОСТ, АП-25, ФАП) устанавливают базовые требования к человеко-машинным интерфейсам (ЧМИ), однако не содержат конкретных алгоритмов ввода и индикации данных и методик их проектирования, что допускает множественность технических реализаций.

В некоторых отечественных кооперациях соисполнителей различные компоненты человека-машинного интерфейса (ЧМИ) кабины пилотов проектируются независимыми разработчиками.

В случае авиационного многофункционального пульта управления (МФПУ) (рис. 1), предназначенного для ввода данных для решения широкого круга функциональных задач, и имеющего сложную разветвленную кадровую структуру (более 100 кадров



и до 3 уровней глубины меню), отсутствие строгой методики проектирования приводит к тому, что интерфейсы получаются несогласованными: различается логика переходов по кадрам, могут отличаться алгоритмы ввода данных, именования элементов, цветовое кодирование информации. Это потенциально создает дополнительную когнитивную нагрузку на пилотов, замедляет формирование динамических стереотипов и увеличивает вероятность ошибок, в частности вследствие негативного переноса.



Рис. 1. Многофункциональный пульт управления

Fig. 1. Multifunction Control Display Unit (MCDU)

В таких условиях особую актуальность приобретают системные методы проектирования (Анохин, 2010; Анохин, Назаренко, 2010; Глухова и др., 2020; Adelstein at al, 2006), учитывающие человеческий фактор на всех этапах жизненного цикла (Adelstein at al, 2006), а также разработка на ранних этапах жизненного цикла унифицированного согласованного набора базовых компонентов человеко-машинного интерфейса и специализированного ПО, обеспечивающего автоматизацию разработки.

Описание методики разработки кадров

Общий порядок разработки человеко-машинных интерфейсов (рис. 2) представлен в (Анохин, Назаренко, 2010, Adelstein at al, 2006), он включает в себя анализ аналогов и требований технического задания, функциональное проектирование, анализ работы экипажа, проектирование интерфейса и последующие этапы верификации и валидации.

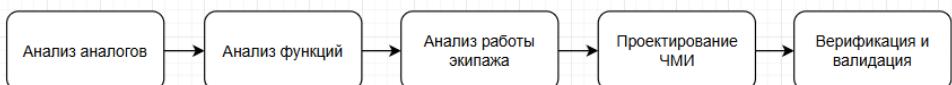


Рис. 2. Процесс разработки человеко-машинных интерфейсов

Fig. 2. The process of developing human-machine interfaces

Методика разработки представляет собой ряд последовательно применяемых методов. При этом входными данными для каждого метода являются результаты применения предыдущего. Для первого метода входными данными является техническое задание и результат анализа аналогов. Результатом последнего метода является разработанный человеко-машинный интерфейс кадров МФПУ и документация на ЧМИ.

Первым этапом методики разработки человека-машинного интерфейса является анализ функциональных требований к интерфейсу. Вначале определяются функции системы, затем — уровень автоматизации и выделяются функции, выполняемые экипажем.

Анализ функциональных требований удобно проводить в нотации UML-диаграммы вариантов использования (рис. 3) (Буч, Рамбо, Якобсон, 2006), с той степенью детализации, которая необходима для постановки вопроса экспертом с целью получения конкретного порядка действий, записываемых в нотации пользовательских историй (Паттон, 2019).

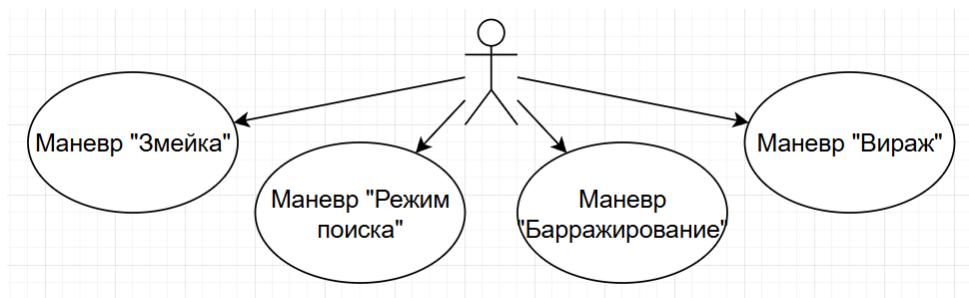


Рис. 3. UML — диаграмма вариантов использования (функции) автоматического маневрирования

Fig. 3. UML — diagram of the use cases for the automatic maneuvering function

Порядок выполнения работы экипажа выявляется экспертным путем с помощью метода пользовательских историй Джейффа Паттона (Паттон, 2019). Пользовательские истории представляют собой метод работы с экспертами, позволяющий выявить и зафиксировать требования пользователей к продукту, а также основные шаги работы пользователей.



Перед началом работы методом пользовательских историй необходимо выполнить два ключевых условия:

- убедиться, что диаграмма вариантов использования (функций) полностью отражает требования технического задания;
- сформировать команду разработчиков, включающую в себя опытных экспертов по работе с аналогичными системами, специалиста по конкретной системе и системного аналитика.

Процесс анализа проводится в формате рабочего совещания. Эксперты последовательно описывают действия оператора при выполнении каждой функции. Все действия фиксируются в виде прямоугольных элементов (на цифровой диаграмме или физических стикерах), которые располагаются в соответствии с реальной последовательностью работы оператора (рис. 4). Такой формат представления информации является для экспертов наиболее естественным, так как соответствует их привычному мышлению (линейной последовательности выполнения действий). Помимо самих действий, эксперты обычно указывают особые условия их выполнения и важные нюансы работы. Эти дополнительные сведения следует фиксировать отдельно — с помощью заметок или элементов другого цвета/формы.

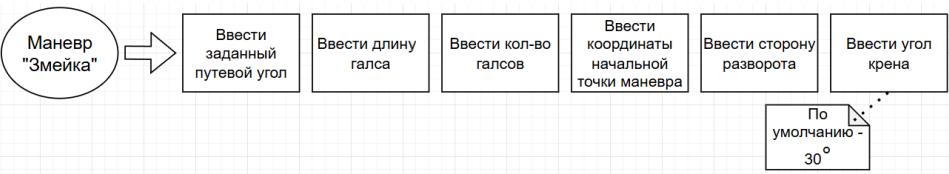


Рис. 4. Пользовательская история ввода данных для выполнения маневра «Змейка»

Fig. 4. User story for performing the “Snake” maneuver

В ходе обсуждения естественным образом формируются макеты интерфейсов. Они возникают спонтанно, когда эксперты наглядно демонстрируют, как оператор взаимодействует с системой. Эти макеты следует оформлять на отдельных листах или крупных стикерах, чтобы в дальнейшем использовать их как основу для работы.

Совещание носит итеративный характер — задачи, комментарии и макеты могут многократно корректироваться до достижения полного консенсуса среди экспертов. Для сложных функций этот процесс может растянуться на несколько дней или недель.

Этот этап крайне важен и не подлежит сокращению, так как позволяет:

- учесть все требования и тонкости;
- внести корректизы с минимальными затратами;
- предотвратить дорогостоящие изменения на поздних стадиях.

Итогом работы должны стать:

- детализированные пользовательские истории;
- утвержденные макеты интерфейсов;
- единое мнение всех участников процесса.



На основе разработанных пользовательских историй выполняется анализ задач: все действия оператора выстраиваются в иерархическую структуру — дерево задач (рис. 5) в нотации НТА (Annett, Duncan, 1967; Hollnagel, 2003; Kirwan, Ainsworth, 1992; Stanton, 2006; Mamessier, Feigh, 2016). Необходимо проверить, что учтены и выполняются все функции, определенные по результатам анализа функций.

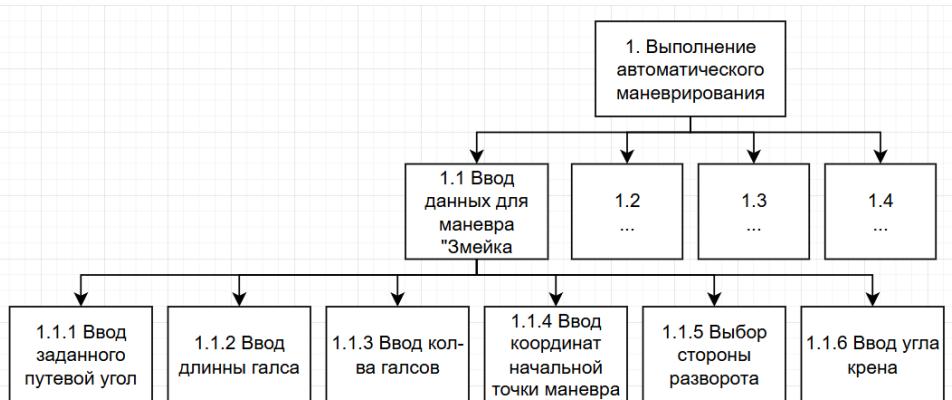


Рис. 5. Фрагмент дерева задач экипажа

для выполнения автоматического маневрирования в нотации НТА

Fig. 5. Fragment of the task tree for performing automatic maneuvering in HTA notation

Далее на основе дерева задач и библиотеки компонентов интерфейса разрабатывается кадровая структура (рис. 6) и наполнение кадров МФПУ (рис. 7). На каждом этапе работы интерфейс МФПУ должен предоставлять пользователю именно ту информацию и те возможности управления, которые ему необходимы для решения текущей задачи. Поэтому кадровая структура формата во многом повторяет иерархическую структуру дерева задач. Нижний уровень дерева задач — операции — соответствуют функциям ввода данных МФПУ.



Рис. 6. Кадровая структура

Fig. 6. Frame structure

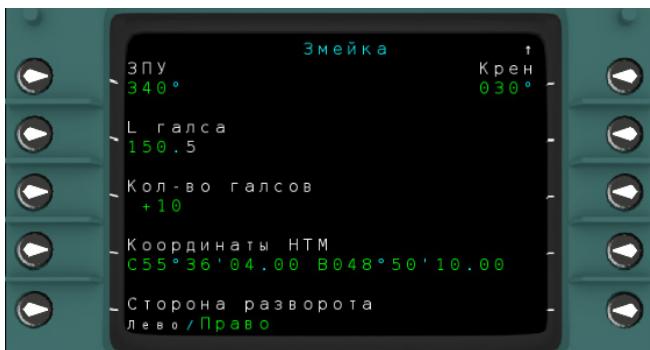


Рис. 7. Кадр МФПУ «Змейка»

Fig. 7. MCDU frame «Snake»

Для моделирования кадров используется специализированное ПО «АСП МФПУ» (Глухова и др., 2020; Glukhov et al., 2020), позволяющее разрабатывать модели кадров на основе унифицированного набора компонентов. Разработчики создают в ПО иерархически связанные между собой типовые элементы интерфейса, такие как кадры и функции ввода данных и заполняют их свойства (название, диапазоны изменения параметров и т.д.). ПО «АСП МФПУ» имеет встроенный интерактивный имитатор, на котором отображается результат проектирования: созданные кадры МФПУ.

Каждый разработанный кадр тестируется на встроенном в ПО «АСП МФПУ» имитаторе с обязательным контролем полноты функциональности — все задачи из дерева задач должны быть выполнимы через созданный интерфейс. Также необходимо проверить учет всех требований и нюансов, указанных в заметках к пользовательским историям.

Для тестирования разрабатываются детализированные сценарии, основанные на ранее созданных пользовательских историях. Ключевые требования к сценариям:

- полное текстовое описание всех операций;
- использование только реальных, правдоподобных данных (эксперты всегда проверяют логичность, правдоподобность и согласованность информации, поэтому любые несоответствия могут затруднить процесс тестирования).

Процесс отработки кадров заключается в том, что каждый из экспертов проходит все тестовые сценарии на имитаторе МФПУ. Другие эксперты при этом могут быть независимыми наблюдателями и фиксировать в блокнотах возникающие у оператора трудности.

После прохождения всех сценариев всеми экспертами необходимо проанализировать результаты и, при необходимости, провести доработку кадров.

В случае, если не были учтены какие-либо важные факторы, следует вернуться к историям и дорабатывать вначале истории, а затем деревья задач и кадры.

После доработки кадров необходимо также доработать сценарии и повторить отработку.



Документация на разработанные кадры выпускается путем автогенерации по данным модели в ПО «АСП МФПУ».

Общая схема методики представлена на рисунке 8.

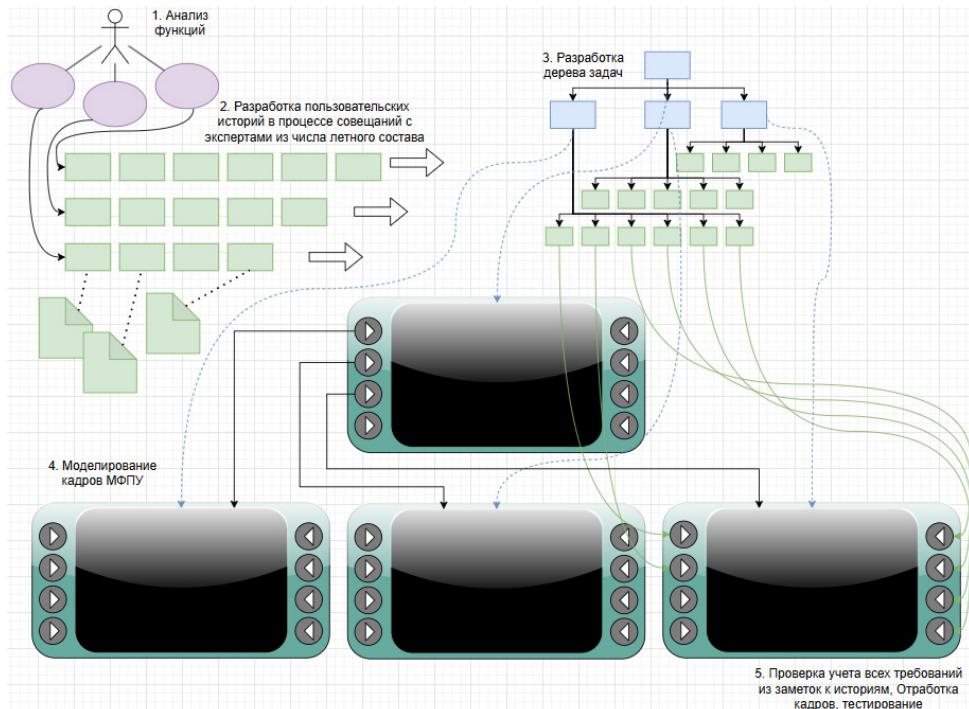


Рис. 8. Методика системного проектирования кадров МФПУ

Fig. 8. The methodology of the system design of the MCDU

Экспериментальное исследование методики

С целью апробации предложенной методики было проведено экспериментальное исследование. Основной задачей эксперимента было подтверждение гипотезы о том, что применение разработанной методики позволяет унифицировать кадровые структуры, получаемые независимые разработчики.

В эксперименте участвовали 10 независимых испытуемых. Они были разделены на две группы: экспериментальную, в составе которой было семь человек, и контрольную, состоящую из трех человек.

Всем испытуемым было выдано одинаковое техническое задание на проектирование кадров МФПУ для выполнения функции автоматического коррекции счисленных координат, а также функции автоматического маневрирования. Также



испытуемым были выданы ноутбуки с установленным ПО «АСП МФПУ» и описание интерфейса МФПУ.

Экспериментальная группа дополнительно получила описание методики системного проектирования.

Все испытуемые выполнили задачу проектирования кадров в срок три дня. При этом испытуемые контрольной группы получили результат на 20% быстрее.

Испытуемые контрольной группы в результате проектирования получили существенно отличающиеся кадровые структуры (рис. 9), при этом отличие было не только в переходах по кадрам, но и в их количестве и принципе компоновки.

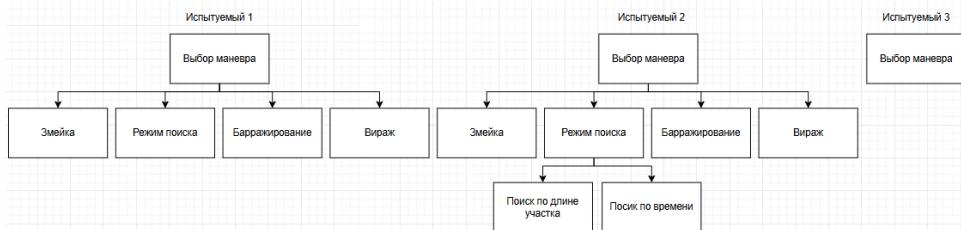


Рис. 9. Результаты проектирования контрольной группы

Fig. 9. Design Results of the Control Group

Испытуемые экспериментальной группы, использовавшие при проектировании предлагаемую в статье методику, получили практически одинаковые кадровые структуры (рис. 10), которые соответствовали аналогичным кадрам, разработанным для бортового МФПУ.

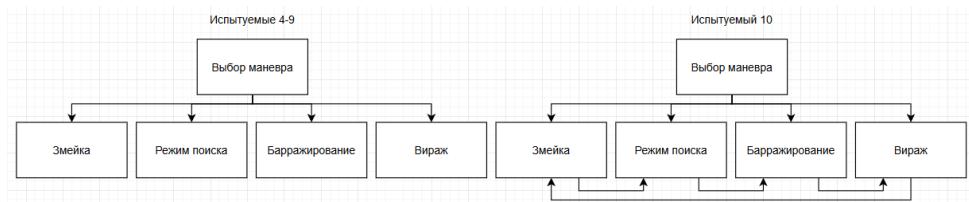


Рис. 10. Результаты проектирования экспериментальной группы

Fig. 10. Design Results of the Experimental Group

Для получения числовой характеристики сходства кадровых структур внутри экспериментальной и контрольной групп и их сравнения для каждой кадровой структуры была разработана матрица переходов (рис. 11).

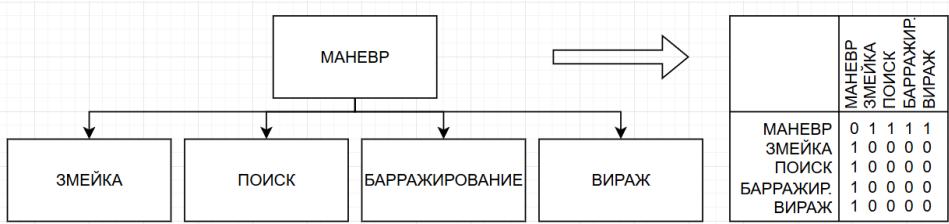


Рис. 11. Матрица переходов между кадрами

Fig. 11. Frame transition matrix

Матрица переходов A размером $n \times n$ (где n — количество кадров) строится следующим образом:

$$A_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{если существует переход из кадра } i \text{ в кадр } j, \\ 0, & \text{в противном случае.} \end{cases} \quad (1)$$

Например, для системы с пятью кадрами, представленной на рисунке 9 матрица будет иметь вид (2):

$$A = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad (2)$$

Далее проводилось попарное сравнение матриц переходов внутри групп: экспериментально и контрольной. Затем результаты сравнения усреднялись внутри групп и сравнивались.

Сравнение проводилось по критерию K — проценту совпадений элементов матриц переходов.

Вычисление процента совпадений K между двумя матрицами: пусть даны две бинарные матрицы A и B размерности $m \times n$, где:

$a_{ij} \in \{0,1\}$ — элемент матрицы A в i -й строке и j -м столбце,
 $b_{ij} \in \{0,1\}$ — элемент матрицы B в i -й строке и j -м столбце.

$$K(A, B) = \frac{1}{m \cdot n} \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \delta(a_{ij}, b_{ij}) * 100\%, \quad (3)$$

где $\delta(a_{ij}, b_{ij})$ — функция Кронекера, равная:

$$\delta(a_{ij}, b_{ij}) = \begin{cases} 1, & \text{если } a_{ij} = b_{ij} \\ 0, & \text{иначе.} \end{cases} \quad (4)$$



Результат попарного сравнения матриц по проценту совпадений представлен на рисунке 12.

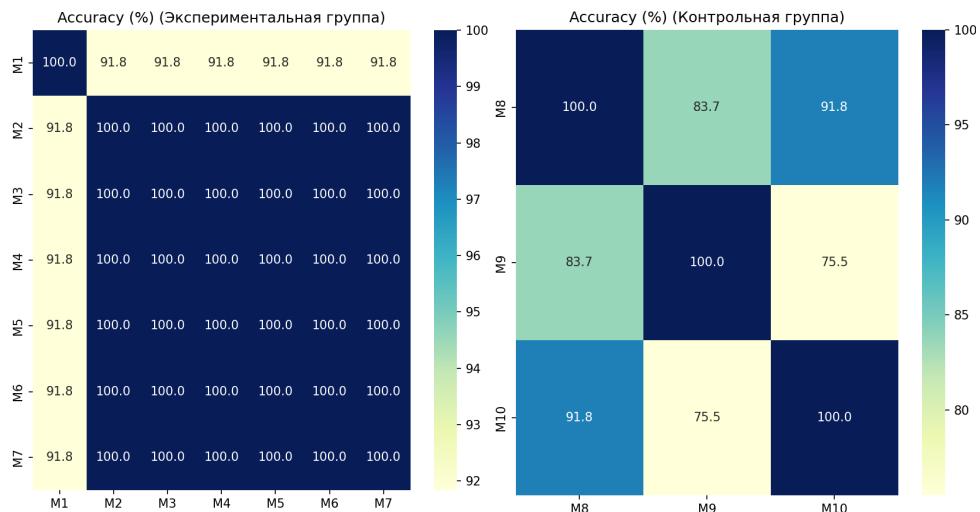


Рис. 12. Результат попарных сравнений матриц переходов для экспериментальной (слева) и контрольной (справа) групп для задачи автоматического маневрирования

Fig. 12. Result of pairwise comparisons of transition matrices for experimental (left) and control (right) groups for the automatic maneuvering task

Для сравнения результатов экспериментальной и контрольной групп вычисляется среднее значение процента совпадений для каждой группы по формуле:

$$\bar{K}_{\text{группа}} = \frac{2}{N(N-1)} \sum_{m=1}^{N-1} \sum_{k=m+1}^N K(A_m, B_k), \quad (5)$$

где N — количество матриц в группе.

Результаты представлены в таблице 1.

Таблица 1 / Table 1

Средний процент совпадений при попарном сравнении матриц перехода между кадрами

Average percentage of matches in pairwise comparison of transition matrices between frames

	% совпадения для экспериментальной группы	% совпадения для контрольной группы	Различие в % между группами
Ввод данных для автоматического маневрирования	97.7%	83.7%	14.0%
Коррекция счисленных координат	97.6%	85.2%	12.4%



Для получения статистической значимости различий между группами применяется точный перестановочный тест (Good, 2005): р-значение вычисляется как вероятность получить наблюдаемую разницу или более экстремальную при условии, что:

- нулевая гипотеза (H_0) верна (группы значимо не различаются),
- распределение сходства между матрицами одинаково для обеих групп.

Определим статистику критерия D:

$$D = \bar{K}_A - \bar{K}_B, \quad (6)$$

где \bar{K}_A — среднее сходство матриц экспериментальной группы,

\bar{K}_B — среднее сходство матриц контрольной группы.

Рассмотрим все возможные разбиения 10 матриц на группы размером 7 и 3. Число таких разбиений:

$$N = C_{10}^7 = 120 \quad (7)$$

Для каждого разбиения π_k , $k=1,\dots,120$ вычислим значение статистики D_k .

Эмпирическое р-значение вычисляется как:

$$p = \frac{1 + \sum_{k=1}^N I(D_k \geq D_{\text{набл}})}{1 + N} \quad (8)$$

где $I(\cdot)$ — индикаторная функция,

$D_{\text{набл}}$ — наблюдаемое значение статистики.

В результате расчетов получаем, что в обоих экспериментах существует только один вариант перестановок, при котором $I(D_k \geq D_{\text{набл}})$, таким образом:

$$p = \frac{1+1}{1+120} \approx 0,0083 \quad (10)$$

Таким образом, только в ~0.83% случаев случайные перестановки имеют большее различие между средним сходством матриц в экспериментальной и контрольной группе, чем в эксперименте.

Таким образом, предложенная методика позволяет повысить единообразие кадровых структур МФПУ в среднем на 13%. Единообразие компонентов интерфейса гарантируется применением ПО «АСП МФПУ» при разработке. В обоих экспериментах получены высокозначимые результаты ($p=0.0083$), что позволяет с уверенностью отвергнуть нулевую гипотезу об отсутствии различий между группами.

Предложенный метод не требует предположений о распределении данных и точно контролирует ошибку I рода. Этот метод особенно эффективен для малых выборок. Ограничением является требование одинаковой размерности матриц.

С целью оценки разработанных интерфейсов могут быть применены методы экспертного оценивания (Анохин, 1996; Грешников и др., 2020; Greshnikov et al., 2020),



а также методика расчета времени решения задачи на основе моделирования (Корсун и др., 2023; Korsun et al., 2023) и методы объективной оценки на основе анализа газодвигательной активности пилотов (Куравский, 2025).

Оценка первоначального варианта формата «МАНЕВР» и доработанного на основе предложенной методики методом анализа иерархий

Для апробации методики на практике было также проведено экспертое оценивание двух вариантов бортовых кадров МФПУ: первоначального, разработанного без применения системного подхода, а также финального, разработанного с применением системного подхода и предлагаемой методики и ПО и интегрированного в бортовой МФПУ.

Экспертное оценивание проводилось методом парных сравнений Саати.

Метод парных сравнений, разработанный Томасом Саати в рамках теории анализа иерархий (Analytic Hierarchy Process, AHP), позволяет количественно оценить относительную важность критериев и альтернатив на основе субъективных суждений экспертов (Анохин, 1996; Смородинский, Батин, 2010). При сравнении альтернатив по некоторым критериям, эти критерии так же попарно сравниваются и взвешиваются, и их веса учитываются при финальной оценке альтернатив.

В процессе выполнения сравнения каждый эксперт заполняет анкету, в которой производится сравнение попарно всех альтернатив по всем критериям, а также попарное сравнение всех критериев.

Расчет результатов анкетирования для одного эксперта производится следующим образом:

Цена альтернативы по критерию k находится по формуле:

$$C_{ik} = \sqrt[N]{\prod_{j=1}^N X_{ij}}, \quad (11)$$

где $i=1, \dots, N$;

N — кол-во альтернатив;

X — числовое значение превосходства одного критерия над другим, определяется по таблице 2.

Таблица 2 / Table 2

Числовые значения результатов анкетирования

Numerical values of the survey results

X_{ij}	Значение
1	i-я и j-я альтернативы равнозначны
3	Слабое предпочтение i-той альтернативы
5	Сильное предпочтение i-той альтернативы
7	Очень сильное предпочтение i-той альтернативы
9	Абсолютное предпочтение i-той альтернативы



Далее находится сумма цен альтернатив по формуле:

$$C_k = \sum_{i=1}^N C_{ik} \quad (12)$$

Веса альтернатив находятся по формуле:

$$V_{ik} = \frac{C_{ik}}{C_k} \quad (13)$$

Аналогичным образом находятся веса критериев V_k . Для получения финальной оценки V_{Ai} альтернатив веса альтернатив по различным критериям суммируются с учетом весов критериев:

$$V_{Ai} = \sum_{k=1}^K V_{ik} * V_k \quad (14)$$

Далее результаты анкетирования нескольких экспертов усредняются.

В исследовании сравнивались два варианта кадров МФПУ для выполнения задач автоматизированного маневрирования: разработанный до внедрения в разработку предлагаемой технологии и вариант, разработанный с ее применением, а также с применением ПО «АСП МФПУ» и методики системного проектирования.

Сравнение производится по трем критериям:

1. Удобство навигации;
2. Скорость ввода данных;
3. Надежность работы оператора.

Сравнение проводилось на основе анкетирования трех экспертов (таблица 3).

Таблица 3 / Table 3

Параметры анкетированных экспертов

Parameters of the surveyed experts

№	Специализация, опыт	Возраст
1	Инженер, пилот самолета с одним двигателем сухопутного, ведущий инженер группы анализа состояния безопасности полетов отдела управления рисками департамента управления безопасности полетов ПАО «Аэрофлот»	40 лет
2	Инженер — пилот многодвигательного сухопутного воздушного судна, летчик — испытатель Внуковского авиаремонтного завода № 400, командир 235 отдельного объединенного авиаотряда ГТК «Россия», летчик-испытатель ЛИИ им. Громова	68 лет
3	Виртуальный пилот. Стаж полетов на симуляторе и тренажерах более 10 лет. Освоенные типы ВС на симуляторах: B737—300, B737—800, A319, A320, A321, Bombardier dash 8 Q400	35 лет

Экспертам были представлены последовательно два варианта кадров МФПУ, предназначенные для решения задач автоматизированного маневрирования.



Для демонстрации кадров применялся интерактивный имитатор МФПУ. После ознакомления эксперты заполнили анкеты.

В начале анкеты выполнялось взвешивание критериев. Получившееся распределение весов критериев представлено в таблице 4.

Таблица 4 / Table 4

Результаты взвешивания критериев
The results of the criteria weighting

Критерий	Эксперт 1	Эксперт 2	Эксперт 3	Среднее
Удобство навигации	0,22	0,20	0,69	0,37
Скорость ввода данных	0,07	0,08	0,08	0,08
Надежность работы оператора	0,71	0,72	0,23	0,55

Затем выполнялась сравнение всех вариантов попарно по каждому критерию. Результаты оценивания с учетом весов критериев представлены в таблице 5.

Таблица 5 / Table 5

Результаты оценивания кадров МФПУ
MCDU frame evaluation results

Вариант кадров	Эксперт 1	Эксперт 2	Эксперт 3	Среднее
Старый	0,11	0,17	0,17	0,14
Новый	0,89	0,83	0,83	0,86

Таким образом, в результате исследования было выявлено значительное предпочтение экспертами кадров МФПУ, разработанных с применением предлагаемой в работе методики проектирования и специализированного ПО «АСП МФПУ».

Заключение

В статье рассмотрен порядок разработки человека-машинного интерфейса МФПУ, обеспечивающий проектирование согласованных кадров независимыми разработчиками. Рассмотрены причины, по которым согласованность ЧМИ непосредственно влияет на эффективность и надежность работы экипажа, в частности, может провоцировать проявление опасного психофизиологического фактора негативного переноса.

Предложенная методика основана на системных методах проектирования. Методика апробирована в экспериментальном исследовании, которое показало, что ее применение позволяет повысить единообразие и согласованность человека-машинного интерфейса МФПУ.

Также в статье упоминается специализированное программное обеспечение ПО «АСП МФПУ», с помощью которого проводится моделирование кадров и их отработка и выпуск документации на ЧМИ.



Совокупный результат применения специализированного ПО и методики оценивается методом экспертного оценивания в сравнении с разработанными до появления ПО и методики вариантами кадров МФПУ.

Предложенные решения применяются при разработке ЧМИ бортового МФПУ и показывают высокую эффективность в условиях кооперации независимых разработчиков.

Разработанный в исследовании метод перестановочного теста для анализа сходства бинарных матриц в малых выборках ($N=10$) продемонстрировал высокую чувствительность при оценке значимости различий между группами разработчиков. Его ключевое преимущество — способность обеспечивать точный контроль ошибки I рода без предположений о распределении данных, что критически важно для экспериментов с ограниченным объемом выборки. Полученное p -значение (0.0083) подтвердило статистическую значимость влияния методики на единобразие интерфейсов. Метод особенно ценен для эргономических исследований, где стандартные статистические подходы часто требуют больших объемов данных, а экспериментальные группы формируются ограниченно (например, требуют участия редких специалистов).

Список источников / References

1. Анохин, А.Н. (1996). *Методы экспертных оценок*. Учебное пособие. Обнинск: ИАТЭ.
Anokhin, A.N. (1996). *Methods of Expert Evaluations*. Textbook. IATE. (in Russian).
2. Анохин, А.Н., Назаренко Н.А. (2010). Проектирование интерфейсов. *Биотехносфера*, (2), 21—27.
Anokhin, A. N., & Nazarenko, N. A. (2010). Interface design. *Biotehnosfera*, (2), 21—27. (in Russian).
3. Буч, Г., Рамбо, Д., Якобсон, И. (2006). *Язык UML. Руководство пользователя* (2-е изд.; Н. Мухин, Пер.). ДМК Пресс. (Оригинальное опубликовано в 1999).
Booch, G., Rumbaugh, J., & Jacobson, I. (2006). *The Unified Modeling Language User Guide*. (N. Mukhin, Trans.; 2nd ed.). DMK Press. (Original work published 1999). (in Russian).
4. Глухова, Э.Д., Глухов, М.А., Кривоноженков, В.А., Целиков, А.С. (2020). Технология разработки вариантов индикационных форматов, обеспечивающих решение функциональных задач авиационных комплексов. *Труды ГосНИИАС. Серия: Вопросы авионики*, (1(47)), 21—26. <https://elibrary.ru/item.asp?id=42413057>.
Glukhova, E.D., Glukhov, M.A., Krivonozhenkov, V.A., & Tselikov, A.S. (2020). Technology for developing variants of indication formats ensuring the solution of functional tasks of aviation complexes. *Trudy GosNIIAS. Seriya: Voprosy avioniki*, (1(47)), 21—26. <https://elibrary.ru/item.asp?id=42413057> (in Russian).
5. Грешников, И.И., Лаврова, Г.А., Сальников, Т.Д., Златомрежев, В.И., Сергеева, Г.В. (2020). Методика субъективных оценок информационно-управляющего поля кабины пилотов. *Нейрокомпьютеры: разработка, применение*, 22(3), 18—25. <https://doi.org/10.18127/j19998554-202003-02>.
Greshnikov, I.I., Lavrova, G.A., Sal'nikov, T.D., Zlatomrezhev, V.I., & Sergeeva, G.V. (2020). Subjective methodology of the aircraft control and navigation equipment's evaluation. *Neurocomputers*, 22(3), 18—25. <https://doi.org/10.18127/j19998554-202003-02> (in Russian).



6. Козлов, В.В. (2024). *Деятельность и надежность пилота в фокусе человеческого фактора*. ИД Академии Жуковского.
Kozlov, V.V. (2024). *Pilot activity and reliability in the focus of the human factor*. ID Akademii Zhukovskogo. (in Russian)
7. Куравский, Л.С., Грешников, И.И., Глухова, Э.Д. [и др.]. (2025). Комплексная оценка информационно-управляющего поля кабины экипажа гражданского воздушного судна: исследуемые показатели и методы их анализа. *Экспериментальная психология*, 18(2), 236—260. <https://doi.org/10.17759/exppsy.2025180214>
8. Корсун, О.Н., Глухова, Э.Д., Ляхов, В.Д., Скрябиков, Н.В. (2023). Методика расчета времени решения задач ввода данных экипажем в современных авиационных комплексах. *International Journal of Open Information Technologies*, *11*(4), 69—77. EDN OTTMBS.
Korsun, O.N., Glukhova, E.D., Lyakhov, V.D., & Skryabikov, N.V. (2023). Methodology for obtaining time intervals of crew data entry tasks performance in modern avionic systems. *International Journal of Open Information Technologies*, *11*(4), 69—77. EDN OTTMBS. (in Russian).
9. Леонтьев, А.Н. (1975). *Деятельность. Сознание. Личность*. Политиздат.
Leontiev, A. N. (1975). *Activity. Consciousness. Personality*. Politizdat. (in Russian).
10. Ломов, Б.Ф. (ред.). (1982). *Справочник по инженерной психологии*. Машиностроение.
Lomov, B.F. (Ed.). (1982). *Handbook of Engineering Psychology*. Mashinostroenie. (in Russian).
11. Павлов, И.П. (1927). *Лекции о работе больших полушарий головного мозга*. АН СССР.
Pavlov, I.P. (1927). *Lectures on the work of the cerebral hemispheres*. AN SSSR. (in Russian).
12. Паттон, Д. (2019). *Пользовательские истории: искусство гибкой разработки ПО* (О. Потапова, Пер.). Питер. (Оригинальное опубликовано в 2014).
Patton, J. (2019). *User Story Mapping: Discover the Whole Story, Build the Right Product* (O. Potapova, Trans.). Piter. (Original work published 2014). (in Russian)
13. Пономаренко, В.А. (1992). *Психология жизни и труда летчика*. Воениздат.
Ponomarenko, V. A. (1992). *Psychology of the life and work of a pilot*. Voenizdat. (in Russian)
14. Смородинский, С.С., Батин, Н.В. (2010). *Системный анализ и исследование операций: оптимизация решений на основе методов и моделей математического программирования: учебно-метод. пособие*. БГУИР.
Smorodinsky, S.S., & Batin, N.V. (2010). *System analysis and operations research: optimization of decisions based on methods and models of mathematical programming: educational manual*. BGUIR. (in Russian)
15. Adelstein, B., Hobbs, A., O'Hara, J., et al. (2006). Design, development, testing, and evaluation: human factors engineering (NASA/TM-2006—214535). NASA.
16. Annett, J., Duncan K. (1967). Task analysis and training design. *Occupational Psychology*, 41, 211—221.
17. Anokhin, A.N. (2010). The structural system approach to functional design of the control room. In J. Wood (Ed.), *Proceedings of the International Control Room Design Conference:



- ICOCO 2010 (Paris, France, Oct. 25—26, 2010)* (pp. 132—139). Institute of Ergonomics and Human Factors.
18. Glukhov, M.A., Glukhova, E.D., Marunkov, P.A., Barulin A.S. (2020). Application of in-house software to improve the design process of multifunctional aircraft indicators and control panels. *Journal of Physics: Conference Series*, 1864(1), 012118. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1864/1/012118>
19. Good, P. (2005). *Permutation, Parametric and Bootstrap Tests of Hypotheses* (3rd ed.). Springer.
20. Greshnikov, I., Salnikov, T., Ivanov, A. (2020). Expert assessment of the cockpit crew information and control field. *Journal of Physics: Conference Series*, 1958(1), 012018. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1958/1/012018>
21. Hollnagel, E. (2003). *Handbook of Cognitive Task Design*. Lawrence Erlbaum Associates.
22. Kirwan, B., Ainsworth, L.K. (1992). *A Guide to Task Analysis*. Taylor & Francis.
23. Korsun, O.N., Pirozhkov, A.A., Glukhova, E.D., Skryabikov, N.V. (2023). System Methodologies for the Design of Human–Machine Interfaces for Advanced Aircraft. In *Recent Developments in High-Speed Transport* (pp. 23—32). Springer Aerospace Technology. https://doi.org/10.1007/978-981-19-9010-6_3
24. Mamessier, S., Feigh, K. (2016). HTA-Based Tracking of Pilot Actions in the Cockpit. In *Advances in Physical Ergonomics and Human Factors* (pp. 93—103). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-319-41694-6_10
25. Stanton, N.A. (2006). Hierarchical task analysis: development, application, and extensions. *Applied Ergonomics*, 37(1), 55—79. <https://doi.org/10.1016/j.apergo.2005.06.003>

Информация об авторах

Глухова Эмма Дмитриевна, инженер 1 категории ФАУ «Государственный научно-исследовательский институт авиационных систем», Москва, Российская Федерация (ФАУ «ГосНИИАС») ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8814-6685>, e-mail: emma@greenfil.ru

Анохин Алексей Никитич, доктор технических наук, профессор, начальник отдела функционального и системного анализа АО «Росатом Автоматизированные системы управления» (АО «PACУ»), Москва, Российская Федерация; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2261-9659>, e-mail: anokhin@obninsk.ru

Зеркаленков Дмитрий Алексеевич, ведущий инженер «Государственный научно-исследовательский институт авиационных систем», Москва, Российская Федерация (ФАУ «ГосНИИАС») ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-6222-8965>, e-mail: dazerkallenkov@gosniias.ru

Information about the authors

Glukhova Emma Dmitrievna, 1st category engineer, State Research Institute of Aviation Systems (GosNIIAS), Moscow, Russian Federation, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8814-6685>, e-mail: emma@greenfil.ru

Anokhin Aleksey Nikitich, Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department for Functional and Systems Analysis, Joint-Stock Company “Rosatom Automated Control Systems”



Глухова Э.Д., Анохин А.Н., Зеркаленков Д.А. (2025)
Методика системного проектирования
человеко-машинного интерфейса авиационного...
Моделирование и анализ данных, 2025. 15(3), 7–26.

Glukhova E.D., Anokhin A.N., Zerkalenkov D.A. (2025)
Systematic design methodology for the human-machine
interface of an aviation multifunctional control panel...
Modelling and Data Analysis, 2025. 15(3), 7–26.

(JSC “RASU”), Moscow, Russian Federation; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2261-9659>,
e-mail: anokhin@obninsk.ru

Zerkalenkov Dmitry Alekseevich, Leading Engineer, State Research Institute of Aviation Systems, (GosNIIAS), Moscow, Russian Federation, ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-6222-8965>, e-mail: dazerkalenkov@gosniias.ru

Вклад авторов

Глухова Э.Д. — идеи исследования; аннотирование, написание и оформление рукописи; разработка методики и описанного ПО; планирование исследования; проведение эксперимента; сбор и анализ данных; расчет и визуализация результатов исследования.

Анохин А.Н. — научное руководство; формирование финального варианта методики; оценка результатов исследования.

Зеркаленков Д.А. — аннотирование, написание и оформление рукописи; сбор и анализ данных.

Все авторы приняли участие в обсуждении результатов и согласовали окончательный текст рукописи.

Contribution of the authors

Glukhova E.D. — research ideas; annotation, writing and design of the manuscript; development of the methodology and the described software; research planning; conducting the experiment; data collection and analysis; calculation and visualization of the research results.

Anokhin A.N. — scientific supervision; formation of the final version of the methodology; evaluation of the research results.

Zerkalenkov D.A. — annotation, writing and design of the manuscript; data collection and analysis; All authors took part in the discussion of the results and agreed on the final text of the manuscript.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Поступила в редакцию 29.08.2025

Received 2025.08.29

Поступила после рецензирования 03.09.2025

Revised 2025.09.03

Принята к публикации 05.09.2025

Accepted 2025.09.05

Опубликована 30.09.2025

Published 2025.09.30