

ЛЕТАТЕЛЬНЫЕ АППАРАТЫ, АВИАЦИОННЫЕ ДВИГАТЕЛИ И МЕТОДЫ ИХ ЭКСПЛУАТАЦИИ

УДК 629.7.073.6

DOI 10.51955/2312-1327_2024_3_103

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДОВ ТЕОРИИ ВАЖНОСТИ КРИТЕРИЕВ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОПТИМАЛЬНЫХ ВИДОВ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ ПРИ УПРАВЛЕНИИ ВОЗДУШНЫМ СУДНОМ

*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, 38
Санкт-Петербург, 196210, Россия
kgvf@inbox.ru*

*Иван Станиславович Муравьев,
orcid.org/0000-0003-0448-4703,
кандидат технических наук, доцент
Санкт-Петербургский государственный университет
гражданской авиации имени главного маршала авиации А.А. Новикова,
ул. Пилотов, 38
Санкт-Петербург, 196210, Россия
mantus87@mail.ru*

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

Аннотация. Формализация деятельности пилотов при управлении ими воздушными судами (ВС) последнего поколения, в настоящий момент, может оказаться затруднительной ввиду значительных изменений в структуре деятельности человека-оператора. Для наиболее полного анализа порядка управления деятельностью пилотов при использовании различных уровней автоматизации использование только математического аппарата теории вероятностей и методов принятия решений в расплывчатых условиях оказывается недостаточным. В статье представлен результат применения методов теории важности критериев с целью определения наиболее рационального выбора вида деятельности членов экипажей на различных этапах полета и режимах пилотирования ВС последнего поколения.

Ключевые слова: важность критериев, оценка параметров полета, управление деятельностью, степень автоматизации ВС.

APPLICATION OF METHODS OF THEORY OF IMPORTANCE OF CRITERIA FOR DETERMINATION OF ACTIVITIES OF PILOTS IN CONTROL OF AIRCRAFT WITH DIFFERENT LEVEL OF AUTOMATION

*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, Pilotov
Saint-Petersburg, 196210, Russia
kgvf@inbox.ru*

*Ivan S. Muravyev,
orcid.org/0000-0003-0448-4703,
Candidate of Technical Sciences, assistant professor
St. Petersburg State University of Civil Aviation
named after Air Chief Marshal A.A. Novikov,
38, Pilotov
Saint-Petersburg, 196210, Russia
mantus87@mail.ru*

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

Abstract. The formalization of the activities of pilots in the controlling of the latest generation aircraft (AC) is experiencing difficulties due to significant changes in the structure of human activity - the operator. For the most complete analysis of the procedure for controlling the activities of pilots when using various levels of automation, it turns out to be not enough to use only the mathematical apparatus of probability theory and decision-making methods in vague conditions. The article presents the result of applying the methods of the theory of the importance of criteria in order to determine the most rational choice of crew members' activity at various stages of flight and piloting modes of the latest generation aircraft.

Keywords: importance of criteria, evaluation of flight parameters, activity control, degree of aircraft automation.

Введение (Introduction)

Среди множества источников информации, доступных членам экипажа в полете, выделяют следующие три вида, исходя из параметров, получаемых с помощью этих источников [Муравьев, 2022а, с. 68; Муравьев, 2022б, с. 20]:

1. Короткопериодические параметры (КП) – такие параметры полета ВС, которые начинают изменяться практически сразу после изменения положения органов управления; как правило, ими являются параметры пространственного положения ВС;

2. Длиннопериодические параметры (ДП) – такие параметры полета ВС, которые имеют относительную задержку в изменении своей величины после отклонения органов управления пилотом или автоматизированной системой управления; как правило, длиннопериодическими параметрами являются параметры выдерживания режима полета (например, поступательная скорость, вертикальная скорость, высота).

3. Алгоритмизированные параметры (АП) – такие параметры полета ВС и его систем, которые характеризуют степень и состояние режима пилотирования самолетом (автоматизированный, директорный, ручной и т.д.).

Для того, чтобы отобрать необходимые параметры полета для их оценки и правильного принятия решения по корректировке управления ВС, экипажу необходимо сформировать контрольную группу (КГ) источников информации (ИИ), которые на текущем этапе полета и режиме пилотирования наиболее точно характеризуют необходимый параметр или комплекс параметров. Математически оценка предъявляемой пилоту информации может быть представлена в виде отношения, в числителе которого находится количество параметров полета, которое пилоту необходимо оценить на данном этапе полета при заданном уровне автоматизации и конкретных условиях окружающей среды, а в знаменателе – количество доступных пилоту источников информации, с помощью которых определяются указанные параметры. Выделяют шесть основных критериев, выраженных отношениями между имеющимися параметрами двух или одного вида и группой ИИ:

$\frac{ДП}{АП + КП}, \frac{КП}{АП + ДП}, \frac{ДП + КП}{АП}, \frac{КП}{ДП}, \frac{ДП}{АП}, \frac{КП}{АП}$. В зависимости от уровня автоматизации эти критерии распределяются по важности, причем оценка каждого критерия пилотом осуществляется на основе его функциональных характеристик. Действительно, один параметр наиболее устойчиво и достоверно контролируется и оценивается лишь при сравнении его с двумя-тремя другими параметрами: отсюда следует, что самыми эффективными и рациональными с точки зрения функционала деятельности пилота будут отношения $\frac{1}{2}, \frac{1}{3}, \frac{2}{3}, \frac{2}{4}, \frac{2}{5}$ и т. д. (см. табл. 1).

Таблица 1 – Нормализация оценки деятельности пилотов

Характеристика деятельности пилота (экипажа)		Соотношения между оцениваемыми параметрами и источниками информации
приемлема в первую очередь	«отлично»	$\frac{1}{2}, \frac{2}{4}, \frac{3}{6}$
приемлема	«хорошо»	$\frac{1}{3}, \frac{2}{5}, \frac{2}{6}, \frac{3}{7}, \frac{3}{8}$
приемлема с затруднениями	«удовл.»	$\frac{1}{4}, \frac{3}{9}, \frac{2}{7}$ и т.д.
неприемлема	«неудовл.»	$\frac{1}{1}, \frac{2}{2}, \frac{2}{3}, \frac{3}{4}$ и т.д.

Здесь необходимо отметить, что, в соответствии с условиями безопасности, на один оцениваемый параметр полета должно приходиться не более трех используемых пилотом ИИ, т. к. увеличение количества ИИ может привести к искажению смысла оцениваемых параметров [Ayaz et al., 2018, p. 107; Collins, 2020, p. 46; Velichkovskii, 1978, p. 71].

Материалы и методы (Materials and methods)

К основным методам, используемым в настоящей работе, относятся попарное сравнение векторных оценок по методу Эджварта-Парето [Noghin, 2015, p. 1977; Noghin, 2006, p. 558], а также метод новых многокритериальных решающих правил в теории важности критериев [Подиновский, 2019, с. 21-26; Podinovski, 1999, p. 263].

Попарное сравнение векторных оценок по методу Эджварта-Парето сводится к поиску таких векторных оценок из множества предоставленных вариантов, которые не будут доминируемы, т. е. метод позволяет найти те варианты, векторная оценка которых будет считаться наилучшей.

Метод новых многокритериальных решающих правил в теории важности критериев заключается в том, что при сравнении векторных оценок происходит взаимная перестановка критериев по следующим правилам:

1. Для вариантов (векторов) $y = (y_1, y_2, \dots, y_m)$ и $z = (z_1, z_2, \dots, z_m)$ векторное неравенство $y \geq z$ означает, что каждый из элементов y больше или равен соответствующему элементу z : $y_1 \geq z_1, y_2 \geq z_2, y_m \geq z_m$. Следовательно, качественная информация о безразличии критериев y и z , которая записывается как $yI^\Omega z$, будет верна только в том случае, если $y_{\downarrow}^{[1,k]} = z_{\downarrow}^{[1,k]}$, $K = i_1, i_2, \dots, i_r$, т. е. если векторы, полученные упорядочиванием векторов y и z по невозрастанию, равны;

2. Качественная оценка по предпочтительности между вариантами y и z , которая записывается как $yP^\Omega z$, будет верна только в том случае, если $y_{\downarrow}^{[1,k]} \geq z_{\downarrow}^{[1,k]}$, $K = i_1, i_2, \dots, i_r$.

3. В соответствии с [Подиновский, 2019, с. 23], $y_{\downarrow}^{[1,k]}$ – это вектор, который получили из $y^{[1,k]}$ путем упорядочения его компонент по убыванию (невозрастанию). Например, если $k = 3$ для вектора $y = (4, 3, 9, 2)$, то имеем $y_{\downarrow}^{[1,3]} = (9, 4, 3)$.

Результаты (Results)

Рассмотрим процесс управления деятельностью членов экипажа на этапе набора высоты при максимальной степени автоматизации на самолете Airbus A-320. В процессе набора высоты пилотам необходимо контролировать [Мирошниченко, 2018, с. 8; Brière et al., 1993, p. 619] следующие параметры: скорость, темп ее изменения, текущие ограничения скорости, текущую высоту

полета, заданную высоту полета, угол тангажа, угол крена, положение самолета на маршруте полета (рис. 1.).

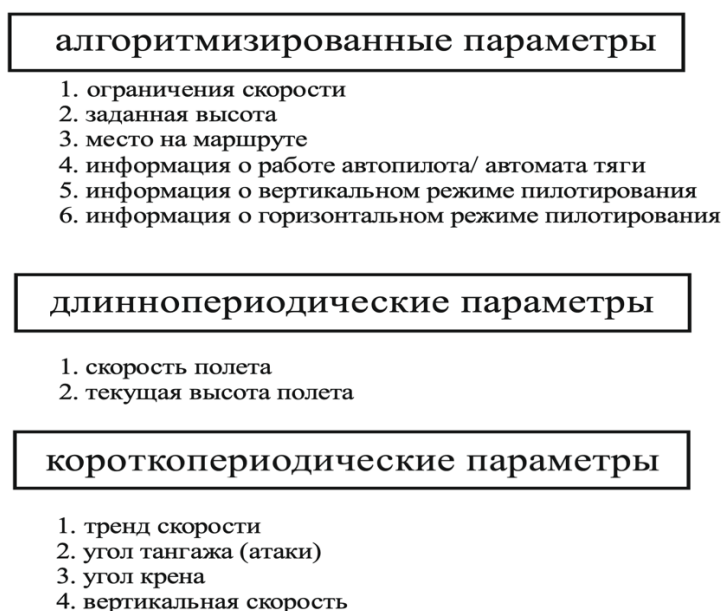


Рисунок 1 – Количество параметров полета, контролируемых на этапе набора высоты при максимальной степени автоматизации ВС с использованием последовательного вида деятельности

Различают следующие виды управления деятельностью (т. е. способы использования информации), используемые экипажем в полете [Муравьев, 2022а, с. 69; Муравьев, 2022б, с. 22]:

1. Последовательное использование информации – процесс оценки состояния ВС и его систем, при котором имеет место последовательное использование членами экипажа одного или нескольких ИИ для определения нескольких параметров, соответствующих каждому источнику;

2. Параллельное использование информации – процесс оценки состояния ВС и его систем, при котором имеет место последовательное использование членами экипажа одного или нескольких ИИ для определения одного комплексного параметра;

3. Параллельно-последовательное использование информации – процесс оценки состояния ВС и его систем, при котором имеет место последовательное использование членами экипажа одного или нескольких ИИ для определения как нескольких параметров, соответствующих каждому из источников, так и для определения комплексных параметров, основанных на одном и более источниках информации. Кроме того, оценка параметров и использование источников информации, доступных пилоту в полете, может осуществляться как с повторением, так и без повторения.

В зависимости от используемого вида деятельности изменяются и количественные составляющие отношений между параметрами и источниками информации (рис. 2). Так, например, ограничения скорости и

заданная скорость полета могут оцениваться пилотом как один параметр в зависимости от того, насколько это рационально на текущем этапе деятельности [Information..., 2010, p. 189].

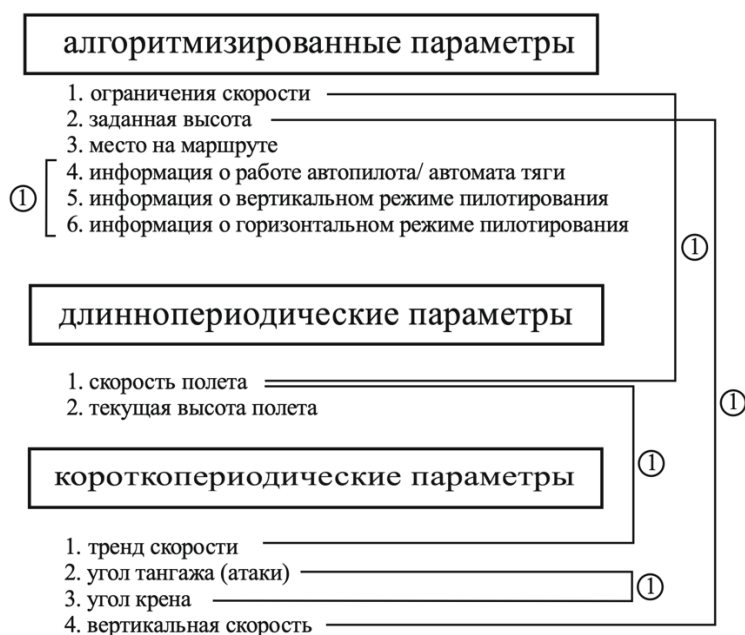


Рисунок 2 – Принцип расчета количества параметров полета, контролируемых на этапе набора высоты при максимальной степени автоматизации ВС с использованием параллельного вида деятельности

Для рассматриваемого случая использования максимальной степени автоматизации в полете в наборе высоты на самолете Airbus A-320 имеем значения критериев, упорядоченные по важности (в порядке убывания), представленные в табл. 2: критерии отображены в столбцах, а в строках указаны варианты отношений между параметрами и источниками информации, которые зависят от видов деятельности пилотов.

Таблица 2 – Распределение критериев в зависимости от видов деятельности пилотов при максимальной степени автоматизации ВС

варианты	виды управления деятельностью	критерии (отношения между оцениваемыми параметрами и используемыми источниками информации)					
		$\frac{ДП + КП}{АП}$	$\frac{ДП}{АП}$	$\frac{КП}{АП}$	$\frac{КП}{ДП}$	$\frac{ДП}{АП + КП}$	$\frac{КП}{АП + ДП}$
		K_1	K_2	K_3	K_4	K_5	K_6
V^1	последовательный	$\frac{6}{6}$	$\frac{2}{6}$	$\frac{4}{6}$	$\frac{4}{2}$	$\frac{2}{10}$	$\frac{4}{8}$
V^2	параллельный	$\frac{4}{4}$	$\frac{2}{4}$	$\frac{3}{4}$	$\frac{3}{2}$	$\frac{2}{6}$	$\frac{3}{5}$

V^3	параллельно-последовательный	$\frac{4}{4}$	$\frac{2}{4}$	$\frac{3}{4}$	$\frac{3}{2}$	$\frac{2}{6}$	$\frac{3}{5}$
V^4	последовательный с повторениями элементов	$\frac{6}{12}$	$\frac{2}{6}$	$\frac{4}{6}$	$\frac{4}{6}$	$\frac{2}{10}$	$\frac{4}{8}$
V^5	параллельно-последовательный с повторениями элементов	$\frac{4}{6}$	$\frac{2}{4}$	$\frac{3}{4}$	$\frac{3}{6}$	$\frac{2}{6}$	$\frac{3}{6}$

Поскольку математическая модель принятия решения включает, помимо множества критериев и множества вариантов, также предпочтения и безразличия (P и I) [Pilot..., 2022, р. 272], необходимо выполнить попарное сравнение векторных оценок имеющихся в таблице вариантов по предпочтительности и безразличию (см. табл. 3).

Таблица 3 – Значения критериев при максимальной степени автоматизации ВС

варианты	критерии					
	K_1	K_2	K_3	K_4	K_5	K_6
V^1	2	4	3	2	2	2
V^2	2	5	2	2	4	3
V^3	2	5	2	2	4	3
V^4	2	4	2	2	2	2
V^5	2	5	2	5	4	5

Попарное сравнение векторных оценок первого и второго вариантов $V^1(2,4,3,2,2,2); V^{(2)}(2,5,2,2,4,3)$ показывает, что они несравнимы по методу Эджварта-Парето, т. к. и в первом, и во втором вариантах есть как меньшие, так и большие значения оценок соответствующих критериев. Второй и третий варианты равнозначны, т. к. $V^2(2,5,2,2,4,3); V^3(2,5,2,2,4,3)$. Третий вариант предпочтительнее четвертого, т. к. $V^3(2,5,2,2,4,3); V^4(2,4,2,2,2,2)$. Пятый вариант также предпочтительнее четвертого: $V^5(2,5,2,5,4,5); V^4(2,4,2,2,2,2)$, а также предпочтительнее третьего $V^5(2,5,2,5,4,5); V^3(2,5,2,2,4,3)$. Первый и пятый вариант несравнимы по предпочтению: $V^5(2,5,2,5,4,5); V^1(2,4,3,2,2,2)$. Пятый и четвертый варианты предпочтительнее второго.

Таким образом, при сравнении векторных оценок пяти рассматриваемых вариантов по методу Эджварта-Парето произошло сужение множества до нулевого (V_0), которое состоит из V^1, V^2, V^3 и V^5 .

Далее необходимо сравнить векторные оценки этих вариантов по методу новых многокритериальных решающих правил в теории важности критериев. Результат сравнения представлен в табл. 4.

Таблица 4 – Распределение усеченных векторов по правилам многокритериального метода при исследовании действий пилотов с использованием максимальной степени автоматизации ВС

j	1	3	4	5
$y^{[2,k]}$ $k = 2,3,4$	4 (4, 3, 2) (2, 4, 3, 2, 2, 2)	5 (5, 2, 2) (2, 5, 2, 2, 4, 3)	4 (4, 2, 2) (2, 4, 2, 2, 2, 2)	5 (5, 2, 5) (2, 5, 2, 5, 4, 5)
$y_{\downarrow}^{[2,k]} v^j$ $k = 2,3,4$	4 (4, 3, 2) (4, 3, 2, 2, 2, 2)	5 (5, 2, 2) (5, 4, 3, 2, 2, 2)	4 (4, 2, 2) (4, 2, 2, 2, 2, 2)	5 (5, 5, 2) (5, 5, 5, 4, 2, 2)

Далее было проведено попарное сравнение векторов из таблицы 4 по предпочтительности (как в прямом, так и в обратном неравенстве), которое показало следующие результаты:

– прямое неравенство: $4 \geq 5; (4,3,2) \geq (5,2,2); (2,4,3,2,2,2) \geq (2,5,2,2,4,3);$

– обратное неравенство:

$5 \geq 4; (5,2,2) \geq (4,3,2); (2,5,2,2,4,3) \geq (2,4,3,2,2,2).$

Как видно из полученных неравенств, рассматриваемые варианты несравнимы по предпочтительности.

Последующие сравнения других пар вариантов позволили установить, что $y^3 P^{\Omega} y^4$, $y^5 P^{\Omega} y^3$, $y^5 P^{\Omega} y^4$, т. е. вариант 3 более предпочтителен, чем вариант 4; вариант 5 более предпочтителен, чем вариант 3; вариант 5 более предпочтителен, чем вариант 4: таким образом, можно сделать вывод о том, что наиболее предпочтительным среди всех вариантов, а, следовательно, и видов деятельности членов экипажа в наборе высоты при использовании максимальной степени автоматизации является пятый вариант – параллельно-последовательное распределение действий с повторением элементов (источников используемой информации и оцениваемых параметров).

Далее были рассмотрены те же самые виды деятельности, но при использовании более низкой степени автоматизации (в частности, при отключенном автомате тяги): при этом на индикаторе работы автопилота (Flight Mode Annunciator, FMA) отсутствует сигнализация о работе автомата тяги [Sarter et al., 1995, p. 81], и пилот вынужден использовать рычаги управления двигателями для регулировки скорости полета, что добавляет дополнительный элемент к короткопериодическим параметрам [Silva et al., 2015, p. 314] (рис. 3), а также приводит к изменению приоритетов по критериям для соответствующей степени использования автоматизации (их новые значения указаны в табл. 5, 6).

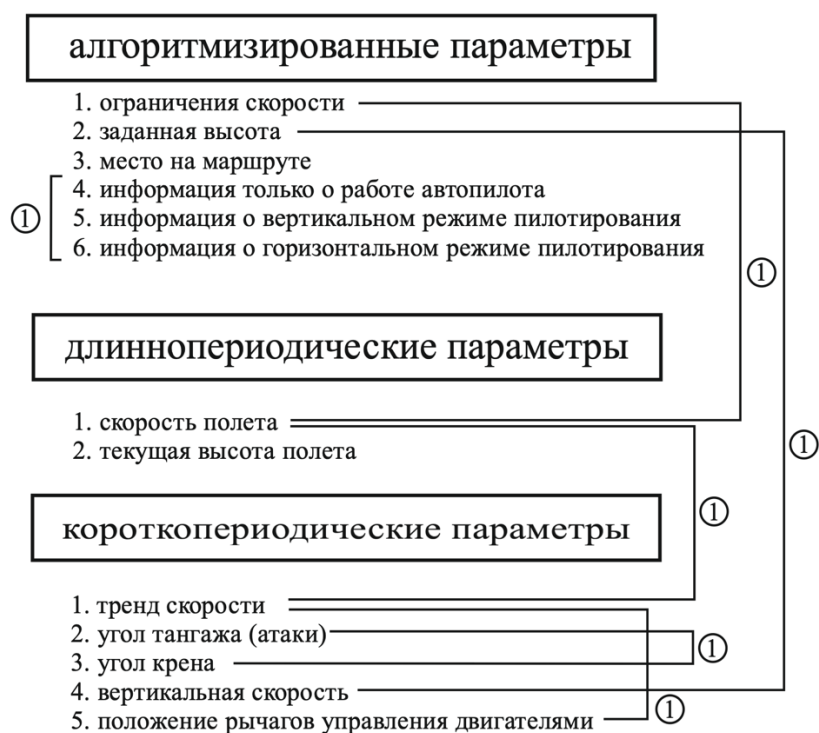


Рисунок 3 – Принцип расчета количества параметров полета, контролируемых на этапе набора высоты при средней степени автоматизации ВС с использованием параллельного вида деятельности

Таблица 5 – Распределение критериев в зависимости от видов деятельности пилотов при использовании средней степени автоматизации ВС

варианты	виды управления деятельностью	критерии (отношения между оцениваемыми параметрами и используемыми источниками информации)					
		$\frac{ДП + КП}{АП}$	$\frac{ДП}{АП}$	$\frac{КП}{АП}$	$\frac{КП}{ДП}$	$\frac{ДП}{АП + КП}$	$\frac{КП}{АП + ДП}$
		K_1	K_2	K_3	K_4	K_5	K_6
V^1	последовательный	$\frac{2}{11}$	$\frac{5}{8}$	$\frac{5}{2}$	$\frac{2}{6}$	$\frac{5}{6}$	$\frac{7}{6}$
V^2	параллельный	$\frac{2}{6}$	$\frac{3}{4}$	$\frac{3}{2}$	$\frac{2}{4}$	$\frac{3}{4}$	$\frac{3}{4}$
V^3	параллельно-последовательный	$\frac{2}{6}$	$\frac{3}{4}$	$\frac{3}{2}$	$\frac{2}{4}$	$\frac{3}{4}$	$\frac{3}{4}$
V^4	последовательный с повторениями элементов	$\frac{2}{11}$	$\frac{5}{8}$	$\frac{5}{2}$	$\frac{2}{6}$	$\frac{5}{6}$	$\frac{7}{6}$
V^5	параллельно-последовательный с повторениями элементов	$\frac{2}{6}$	$\frac{3}{6}$	$\frac{3}{2}$	$\frac{2}{4}$	$\frac{3}{6}$	$\frac{3}{6}$

Таблица 6 – Значения критериев при использовании средней степени автоматизации ВС

варианты	критерии					
	K_1	K_2	K_3	K_4	K_5	K_6
V^1	2	2	2	5	2	2
V^2	5	3	2	5	3	3
V^3	5	3	2	5	3	3
V^4	2	2	2	5	2	2
V^5	5	5	2	5	2	5

После попарного сравнения векторных оценок (табл. 6) по методу Эджварта-Парето получено сужение до нулевого множества $V^5 P^0 V^2 P^0 V^4$: эта запись означает, что равнозначными по предпочтительности оказались второй, четвертый и пятый варианты. Далее было выполнено сравнение этих вариантов по методу многокритериальных решающих правил (табл. 7).

Таблица 7 – Распределение усеченных векторов по правилам многокритериального метода при исследовании действий пилотов с использованием средней степени автоматизации ВС

j	5	2	4
$y^{[1,k]}$ $k=1,2,4,5$	5 (5, 5, 5, 2) (5, 5, 2, 5, 2, 5)	5 (5, 3, 5, 3) (5, 3, 2, 5, 3, 3)	2 (2, 2, 5, 2) (2, 2, 2, 5, 2, 2)
$y_{\downarrow}^{[1,k]} v^j$ $k=1,2,3$	5 (5, 5, 5, 2) (5, 5, 5, 5, 2, 2)	5 (5, 5, 3, 3) (5, 5, 3, 3, 3, 2)	2 (5, 2, 2, 2) (5, 2, 2, 2, 2, 2)

Далее были рассмотрены те же виды деятельности на этапе набора высоты при выполнении полета в ручном режиме пилотирования, т. е. при использовании минимального уровня автоматизации. При таком режиме пилотирования из работы выключен как автомат тяги, так и автопилот, а, следовательно, сменяются приоритеты в расстановке критериев по важности, т. к. указанные условия вновь приведут к смене приоритетов контролируемых экипажем параметров полета и используемых при этом источников информации (см. табл. 8, 9).

Таблица 8 – Распределение критериев в зависимости от видов деятельности пилотов при использовании минимальной степени автоматизации ВС

варианты	виды управления деятельностью	критерии (отношения между оцениваемыми параметрами и используемыми источниками информации)					
		$\frac{КП}{ДП}$	$\frac{КП}{АП}$	$\frac{КП}{АП + ДП}$	$\frac{ДП + КП}{АП}$	$\frac{ДП}{АП + КП}$	$\frac{ДП}{АП}$
		K_1	K_2	K_3	K_4	K_5	K_6
V^1	последовательный	$\frac{2}{6}$	$\frac{6}{5}$	$\frac{6}{7}$	$\frac{8}{5}$	$\frac{2}{11}$	$\frac{2}{5}$
V^2	параллельный	$\frac{2}{3}$	$\frac{3}{4}$	$\frac{3}{4}$	$\frac{4}{4}$	$\frac{2}{7}$	$\frac{2}{3}$
V^3	параллельно-последовательный	$\frac{2}{3}$	$\frac{3}{4}$	$\frac{3}{4}$	$\frac{4}{4}$	$\frac{2}{7}$	$\frac{2}{3}$
V^4	последовательный с повторениями элементов	$\frac{2}{6}$	$\frac{6}{5}$	$\frac{6}{7}$	$\frac{8}{5}$	$\frac{2}{11}$	$\frac{2}{5}$
V^5	параллельно-последовательный с повторениями элементов	$\frac{2}{4}$	$\frac{3}{6}$	$\frac{3}{6}$	$\frac{4}{4}$	$\frac{2}{7}$	$\frac{2}{6}$

Таблица 9 – Значения критериев при использовании минимальной степени автоматизации ВС последовательный

варианты	критерии					
	K_1	K_2	K_3	K_4	K_5	K_6
V^1	5	2	2	2	2	5
V^2	2	3	3	2	2	3
V^3	2	3	3	2	2	3
V^4	5	2	2	2	2	5
V^5	5	5	5	2	2	5

Сравнение данных таблицы 9 по методу Эджварта-Парето позволило осуществить сужение текущего множества вариантов до нулевого множества, состоящего из трех вариантов: V^1, V^2, V^5 . Далее было выполнено сравнение этих вариантов по методу многокритериальных решающих правил (см. табл. 10).

Таблица 10 – Распределение усеченных векторов по правилам многокритериального метода при исследовании действий пилотов с использованием минимальной степени автоматизации ВС

j	1	2	5
$y^{[1,k]}$ $k=1,2,3,6$	5 (5, 2, 2, 2) (5, 2, 2, 2, 2, 5)	2 (2, 3, 3, 3) (2, 3, 3, 2, 2, 3)	5 (5, 5, 5, 5) (5, 5, 5, 2, 2, 5)
$y_{\downarrow}^{[1,k]}v^j$ $k=1,2,3,6$	5 (5, 5, 2, 2) (5, 5, 2, 2, 2, 2)	2 (3, 3, 3, 2) (3, 3, 3, 2, 2, 2)	5 (5, 5, 5, 5) (5, 5, 5, 5, 2, 2)

Обсуждение (Discussion)

Результаты сравнения видов деятельности по методу многокритериальных решающих правил (табл. 4) позволили сделать вывод о том, что наиболее предпочтительным среди всех видов деятельности членов экипажа в наборе высоты при использовании максимальной степени автоматизации является пятый вариант – параллельно-последовательное распределение действий с повторением отдельных элементов (т. е. оцениваемых пилотом параметров полета и состояния систем ВС, а также источников информации, используемых для определения этих параметров).

Результаты сравнения видов деятельности при использовании более низкой степени автоматизации (в частности, при отключенном автомате тяги) (табл. 7) показали, что пятый и второй варианты предпочтительнее четвертого варианта, а также несравнимы по векторным оценкам. Таким образом, можно сделать вывод о том, что при использовании средней степени автоматизации членам экипажа необходимо использовать два вида деятельности – параллельное и параллельно-последовательное (с повторением элементов) распределение действий.

Результаты сравнения видов деятельности при использовании минимального уровня автоматизации (табл. 10) показали, что наиболее предпочтительным является пятый вариант – параллельно-последовательное распределение действий членов экипажа с повторением отдельных элементов.

Заключение (Conclusion)

При рассмотрении одного и того же этапа полета (набора высоты) с применением различных уровней автоматизации для определения наиболее рационального вида деятельности (способа использования ИИ) происходит изменение распределения соответствующих им критериев-отношений по важности. Кроме того, происходит и изменение количественного соотношения между оцениваемыми экипажем параметрами и используемыми для этого источниками информации, что вызвано сменой смысловых предпочтений между оцениваемыми параметрами и используемыми источниками информации при переходе на другой уровень автоматизации. С учетом указанных особенностей было применено два метода сравнения критериев по

предпочтительности: метод Эджварта-Парето и метод многокритериальных решающих правил. Сравнения показали следующие результаты:

1. При использовании любой степени автоматизации в полете необходимо применять параллельно-последовательный способ распределения действий членов экипажа с повторением элементов, при котором имеет место последовательное использование членами экипажа одного или нескольких ИИ для определения как нескольких параметров, соответствующих каждому источнику, так и для определения комплексных параметров, основанных на одном и более источниках информации;

2. При использовании среднего уровня автоматизации необходимо дополнительно обеспечивать параллельный способ распределения действий пилотов, при котором имеет место последовательное использование членами экипажа одного или нескольких ИИ для определения одного комплексного параметра.

Предполагается, что применение указанных способов организации деятельности по использованию доступных пилоту источников информации позволит пилотам наиболее эффективно формировать контрольную группу параметров для обеспечения наиболее надежного способа управления ВС.

Библиографический список

- Мирошниченко А. В.* Поддержание навыков ручного пилотирования ВС А320 при включенном автопилоте. Екатеринбург: Издательские решения, 2018. 15 с.
- Муравьев И. С.* Оценка функционирования системы «экипаж – высокоавтоматизированное воздушное судно – среда» на основе когнитивно-информационных преобразователей алгоритмов деятельности пилотов // Качество и жизнь. 2022а. № 1 (33). С. 65-76. DOI: 10.34214/2312-5209-2022-33-1-65-76. EDN MBHDSР.
- Муравьев И. С.* Роль и место когнитивно-информационных преобразователей алгоритмов деятельности пилотов в процессе управления высокоавтоматизированным воздушным судном // Crede Experto: транспорт, общество, образование, язык. 2022б. № 1. С. 18-36. DOI 10.51955/23121327_2022_1_18. EDN QEHUQA.
- Подиновский В. В. Идеи и методы важности критериев в многокритериальных задачах принятия решений. М.: Наука, 2019. 103 с.
- Ayaz H.* Neuroergonomics / H. Ayaz, F. Dehais. New York: Academic Press, 2018. 366 p.
- Brière D.* AIRBUS A320/A330/A340 electrical flight controls-A family of fault-tolerant systems / D. Brière, P. Traverse // FTCS-23 The Twenty-Third International Symposium on Fault-Tolerant Computing. IEEE, 1993. P. 616-623.
- Collins P.* Automation Max: Optimizing Ai and Human Intelligence in Aviation Hardcover. New York: Algora Pub, 2020. 174 p.
- Information processing in aviation / M. A. Vidulich, C. D. Wickens, P. S. Tsang, J. M. Flach // Human factors in aviation. 2010. P. 175-215.
- Noghin V. D.* Generalized Edgeworth–Pareto principle // Computational Mathematics and Mathematical Physics. 2015. Vol. 55. P. 1975-1980.
- Noghin V. D.* The Edgeworth-Pareto Principle in terms of a fuzzy choice function // Computational Mathematics and Mathematical Physics. 2006. Vol. 46. P. 554-562.
- Pilot decision-making during a dual engine failure on take-off: Insights from three different decision-making models / K. J. Parnell, R. A. Wynne, K. L. Plant, V. A. Banks, T. G. Griffin, N. A. Stanton // Human Factors and Ergonomics in Manufacturing & Service Industries. – 2022. Vol. 32. № 3. P. 268-285.

Podinovski V. V. A DSS for multiple criteria analysis with imprecisely specified trade-offs // *European Journal of operational Research*. 1999. Vol. 113, № 2. P. 261–270. EDN ACGGNH

Sarter N. B. “From tool to agent”: The evolution of (cockpit) automation and its impact on human-machine coordination / N. B. Sarter, D. D. Woods // *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting*. SAGE Publications, 1995. Vol. 39. № 1. P. 79-83.

Silva S. S. Divergence between flight crew mental model and aircraft system state in auto-throttle mode confusion accident and incident cases / S. S. Silva, R. J. Hansman // *Journal of cognitive engineering and decision making*. 2015. Vol. 9. № 4. P. 312-328.

Velichkovskii B. M. Visual Memory and Models of Human Information-Processing // *Soviet Psychology*. 1978. Vol. 16, № 8. P. 68-89.

References

Ayaz H., Dehais F. (2018). *Neuroergonomics*. New York: *Academic Press*. 2018. 366 p.

Brière D., Traverse P. (1993). AIRBUS A320/A330/A340 electrical flight controls-A family of fault-tolerant systems. FTCS-23 The Twenty-Third International Symposium on Fault-Tolerant Computing. 616-623.

Collins P. (2020). *Automation Max: Optimizing Ai and Human Intelligence in Aviation* Hardcover. New York: *Algora Pub*, 2018. 174 p.

Miroshnichenko A. V. (2018). Maintaining manual piloting skills of the A320 aircraft with the autopilot engaged. Ekaterinburg: *Publishing Solutions*. 2018. 15 p. (In Russian)

Muravyev I. S. (2022a). Assessment of the functioning of the system "crew - highly automated aircraft – environment" on the basis of cognitive-information converters of pilots' activity algorithms. *Quality and Life*. 1(33): 65-76. DOI: 10.34214/2312-5209-2022-33-1-65-76. (In Russian)

Muravyev I. S. (2022b). Role and place of cognitive information converters of pilot activity algorithms in the process of control of highly automated aircraft. *Crede Experto: transport, society, education, language*. 1: 18-36. DOI 10.51955/23121327_2022_1_18. (In Russian)

Noghin V. D. (2006). The Edgeworth-Pareto Principle in terms of a fuzzy choice function. *Computational Mathematics and Mathematical Physics*. 46: 554-562.

Noghin V. D. (2015). Generalized Edgeworth–Pareto principle. *Computational Mathematics and Mathematical Physics*. 55: 1975-1980.

Parnell K. J., Wynne R. A., Plant K. L., Banks V. A., Griffin T. G., Stanton, N. A. (2022). Pilot decision-making during a dual engine failure on take-off: Insights from three different decision-making models. *Human Factors and Ergonomics in Manufacturing & Service Industries*. 32(3): 268-285.

Podinovski V. V. (1999). A DSS for multiple criteria analysis with imprecisely specified trade-offs. *European Journal of operational Research*. 113(2): 261–270.

Podinovskiy V. V. (2019). Ideas and methods of criterion importance in multi-criteria decision-making problems. Moscow: Science. 2019. 103 p. (In Russian)

Sarter N. B., Woods D. D. (1995). “From tool to agent”: The evolution of (cockpit) automation and its impact on human-machine coordination. *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting*. 39(1): 79-83.

Silva S. S., Hansman, R. J. (2015). Divergence between flight crew mental model and aircraft system state in auto-throttle mode confusion accident and incident cases. *Journal of cognitive engineering and decision making*. 9(4): 312-328.

Velichkovskii B. M. (1978) Visual Memory and Models of Human Information-Processing. *Soviet Psychology*. 16(8): 68-89.

Vidulich M. A., Wickens C. D., Tsang P. S., Flach J. M. (2010). Information processing in aviation. *Human factors in aviation*. 175-215.