

УДК 629.7.058

DOI 10.34755/IROK.2026.43.81.032

Соколов Олег Аркадьевич

Санкт-Петербургский государственный университет гражданской авиации им. Главного маршала авиации А.А. Новикова

Дмитриев Сергей Андреевич

Санкт-Петербургский государственный университет гражданской авиации им. Главного маршала авиации А.А. Новикова

Евсеев Владислав Валерьевич

Санкт-Петербургский государственный университет гражданской авиации им. Главного маршала авиации А.А. Новикова

Моделирование, количественная оценка трансформации операторской нагрузки пилота и экономической эффективности при различных уровнях автоматизации

Аннотация. Была разработана математическая модель зависимости операторской нагрузки пилота воздушного судна от уровня автоматизации воздушного судна. Рассмотрены различные виды операторской нагрузки и то, как их изменение зависит от типа оборудования воздушного судна, отвечающего за управление рулевыми поверхностями. Получено условие существования оптимального уровня автоматизации $A_{opt} \approx 0,4$, который минимизирует суммарную интенсивность деятельности. Введён энергетический функционал нагрузки, учитывающий накопление утомления. Смоделирован типовой профиль полета и переходный процесс при отказе системы автоматизированного управления (САУ). Рассчитан диапазон автоматизации, который уменьшает вероятность допущения ошибок экипажем. Проанализировано влияние коэффициентов модели на оптимальное значение автоматизации. Изложен обобщенный критерий, который может помочь эксплуатантам оптимизировать работу экипажа. Доказана экономическая эффективность применения автоматизированных систем.

Ключевые слова: операторская нагрузка, автоматизация, оптимальный уровень, моделирование, энергетический функционал нагрузки, экономическая эффективность.

Sokolov Oleg Arkadyevich

Saint-Petersburg State University of Civil Aviation named in honor of Air Chief Marshal of Aviation A.A. Novikov

Dmitriev Sergey Andreevich

Saint-Petersburg State University of Civil Aviation named in honor of Air Chief Marshal of Aviation A.A. Novikov

Evseev Vladislav Valeryevich

Saint-Petersburg State University of Civil Aviation named in honor of Air Chief Marshal of Aviation A.A. Novikov

Modeling, quantitative assessment of pilot workload transformation and economic efficiency at various levels of automation

Abstract. A mathematical model of the dependence of the operator load of an aircraft pilot on the aircraft automation level has been developed. Various types of operator load are considered and how their change depends on the type of aircraft equipment responsible for steering control surfaces. The condition for the existence of an optimal level of automation $A_{opt} \approx 0.4$ is obtained, which minimizes the total intensity of activity. The energy functional of the load has been introduced, taking into account the accumulation of fatigue. A typical flight profile and a transient

process in case of failure of an automated control system (ACS) are modeled. The automation range has been calculated, which reduces the likelihood of mistakes by the crew. The influence of the coefficients of the model on the optimal value of automation is analyzed. A generalized criterion is outlined that can help operators optimize crew performance. The economic efficiency of using automated systems has been proven.

Keywords: operator workload, automation, optimal level, modeling, workload energy functional, economic efficiency.

Введение

Современные воздушные суда являются высокоавтоматизированными. Автоматизация уменьшает моторную и увеличивает когнитивную составляющие нагрузки.

Методика оценки интенсивности деятельности не учитывает:

- нелинейный характер когнитивной нагрузки;
- оптимальность уровня автоматизации;
- переходные процессы при отказах;
- накопительный энергетический эффект утомления.

Целью работы является разработка математической модели, позволяющей определить оптимальный для безопасности полета уровень автоматизации.

Формирование нелинейной модели операторской деятельности

1. Уровень автоматизации

Введем безразмерный параметр уровня автоматизации:

$$0 \leq A \leq 1$$

где: $A = 0$ – полностью ручное управление; $A = 1$ – максимальная автоматизация.

2. Структура деятельности

Деятельность пилота разделяется на три группы операций:

- N_c – контрольные операции (мониторинг систем);
- N_m – моторные операции (непосредственное управление);
- N_l – логические операции (принятие решений, анализ).

Базовые значения (при $A = 0$): N_{c0} , N_{m0} , N_{l0} [операций/этап].

3. Нелинейные зависимости от автоматизации

Моторная составляющая (экспоненциальное подавление):

$$N_m(A) = N_{m0} \cdot e^{(-\alpha \cdot A)}$$

где $\alpha > 0$ – коэффициент интенсивности автоматизации [безразмерный], характеризующий скорость замены моторных действий автоматикой.

Контрольная составляющая (линейный рост):

$$N_c(A) = N_{c0} \cdot (1 + \beta \cdot A)$$

где $\beta > 0$ – коэффициент роста контрольных операций [безразмерный], отражающий необходимость мониторинга автоматизированных систем.

Логическая составляющая (квадратичный рост):

$$N_l(A) = N_{l0} \cdot (1 + \gamma \cdot A^2)$$

где $\gamma > 0$ – коэффициент когнитивной трансформации [безразмерный], описывающий нелинейное усложнение задач принятия решений при высокой автоматизации.

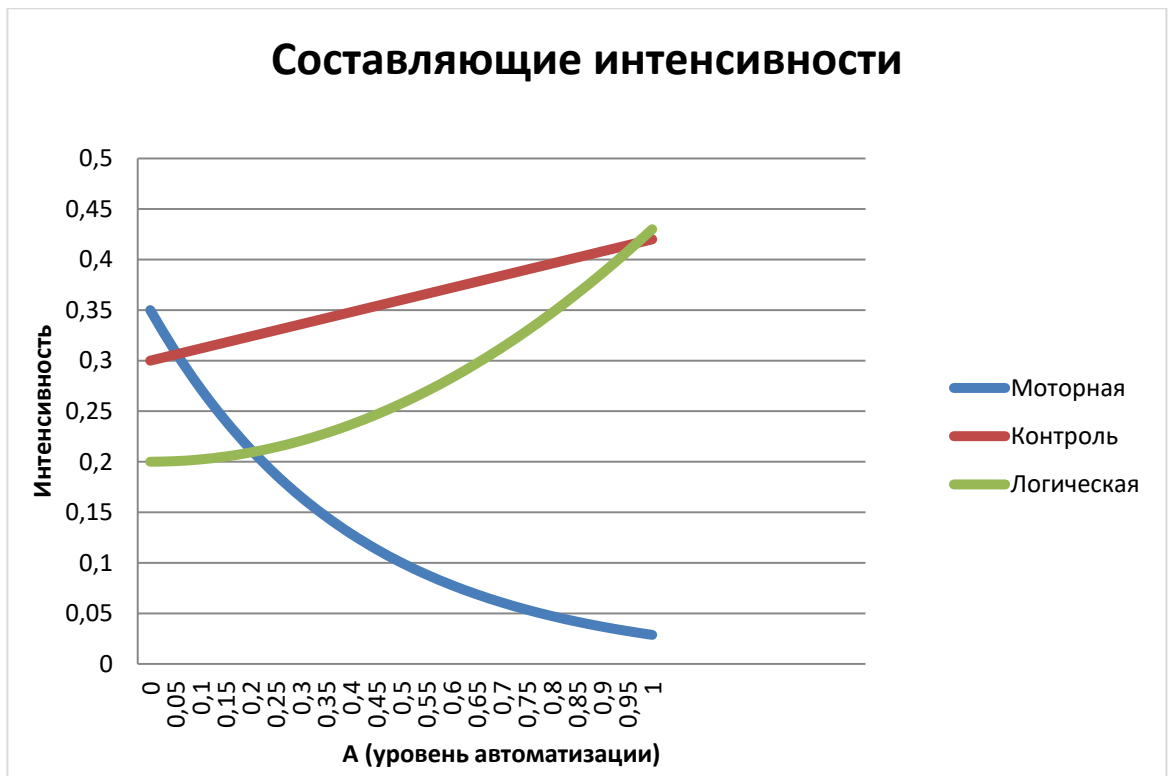


График 1 – Компоненты интенсивности

Интегральная интенсивность деятельности

С учетом различной психофизиологической сложности операций вводятся коэффициенты сложности k_c , k_m , k_l [усл. ед./операция].

Интегральная интенсивность деятельности [усл. ед./с]:

$$I(A) = \frac{k_c \cdot N_c(A) + k_m \cdot N_m(A) + k_l \cdot N_l(A)}{T}$$

где T – длительность этапа полета [с].

Подстановка дает:

$$I(A) = \frac{k_c \cdot N_{c0} \cdot (1 + \beta \cdot A) + k_m \cdot N_{m0} \cdot e^{(-\alpha \cdot A)} + k_l \cdot N_l \cdot (1 + \gamma \cdot A^2)}{T}$$

Функция $I(A)$ имеет U-образный характер.

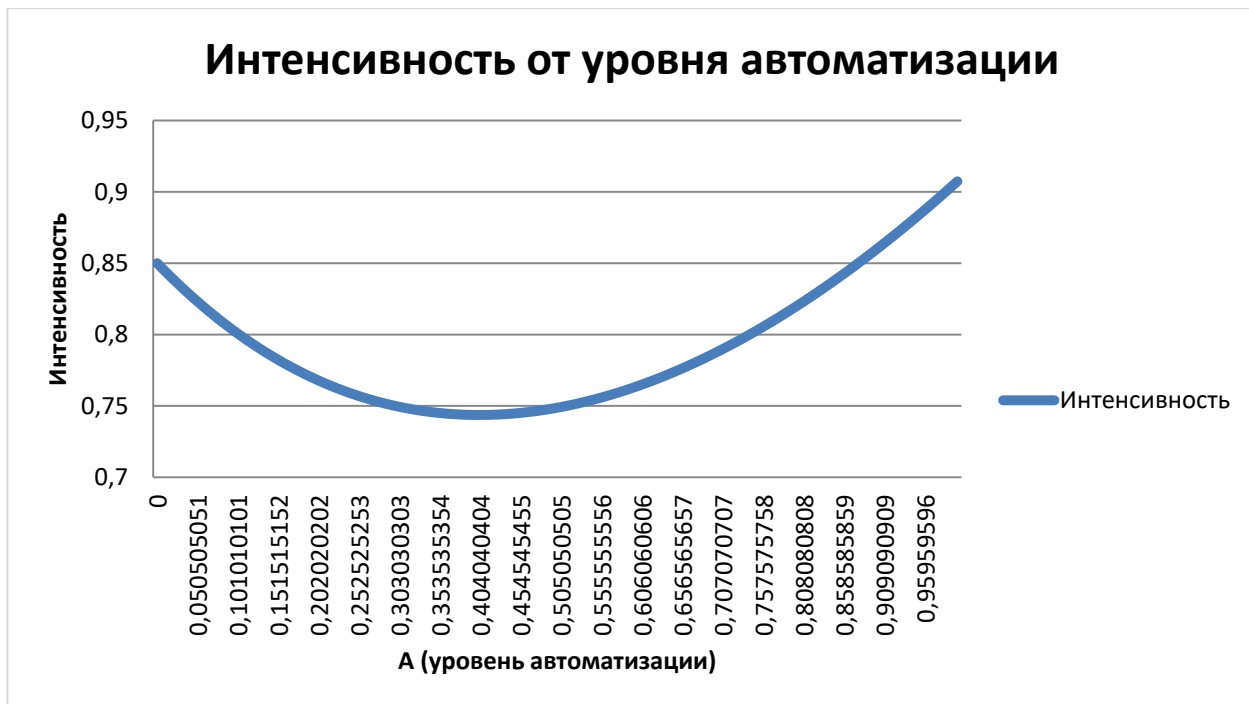


График 2 – Изменение интенсивности

Аналитический вывод оптимального уровня автоматизации

1. Условие экстремума

Оптимальное значение определяется из условия:

$$\frac{dI}{dA} = 0$$

Производная:

$$\frac{dI}{dA} = \frac{k_c \cdot N_{c0} \cdot \beta - k_m \cdot N_{m0} \cdot \alpha \cdot e^{-\alpha \cdot A} + 2 \cdot k_1 \cdot N_{i0} \cdot \gamma \cdot A}{T}$$

Условие оптимума:

$$k_m \cdot N_{m0} \cdot \alpha \cdot e^{-\alpha \cdot A} = k_c \cdot N_{c0} \cdot \beta + 2 \cdot k_1 \cdot N_{i0} \cdot \gamma \cdot A$$

2. Доказательство существования и единственности

Теорема. При выполнении условия $k_m \cdot N_{m0} \cdot \alpha > k_c \cdot N_{c0} \cdot \beta$ существует единственное решение $A_{opt} \in (0, 1)$ уравнения оптимума.

Доказательство. Левая часть уравнения $f_1(A) = k_m \cdot N_{m0} \cdot \alpha \cdot e^{-\alpha \cdot A}$ – строго убывающая функция, $f_1(0) = k_m \cdot N_{m0} \cdot \alpha, f_1(A) \rightarrow 0$ при $A \rightarrow \infty$. Правая часть $f_2(A) = k_c \cdot N_{c0} \cdot \beta + 2 \cdot k_1 \cdot N_{i0} \cdot \gamma \cdot A$ – строго возрастающая линейная функция, $f_2(0) = k_c \cdot N_{c0} \cdot \beta$. При $k_m \cdot N_{m0} \cdot \alpha > k_c \cdot N_{c0} \cdot \beta$ имеем $f_1(0) > f_2(0)$. В силу непрерывности и монотонности функций, пересечение существует и единственно.

3. Численный расчет

Для параметров модели:

- $N_{c0} = 180, N_{m0} = 140, N_{i0} = 60$ [операций];
- $k_c = 1,0, k_m = 1,5, k_1 = 2,0$ [усл. ед./операция];
- $\alpha = 2,0, \beta = 0,4, \gamma = 1,2$ [безразмерные];
- $T = 600$ [с].

Расчет дает минимум при $A_{opt} \approx 0,40$. Значение интенсивности в оптимуме: $I_{min} \approx 0,744$ усл. ед./с. Сравнение с крайними точками: $I(0) = 0,850$ (на 14,2% выше оптимума); $I(1) = 0,907$ (на 21,9% выше оптимума).

Вероятность ошибки экипажа

Использована модель зависимости вероятности ошибки от интенсивности нагрузки:

$$P_{Err}(A) = \frac{1}{1 + e^{-a \cdot (I(A) - I^d_{p\Gamma})}}$$

где $I_{p;t}$ – критический уровень интенсивности [усл. ед./с]; a – коэффициент крутизны перехода [с/усл. ед.].

Для принятых параметров $I_{p;t} = 0,75$, $a = 8$:

- $P_{Er}(0) \approx 0,69$ (высокий риск при ручном управлении);
- $P_{Er}(0,4) \approx 0,49$ (минимум риска);
- $P_{Er}(1) \approx 0,78$ (высокий риск при избыточной автоматизации).

Вывод: минимум вероятности допущения ошибки совпадает с минимумом интенсивности.



График 3 – Изменение вероятности ошибки
Энергетический функционал нагрузки

Для учета накопления утомления введена квадратичная функция:

$$E = \int_0^T I^2(t) dt$$

При стационарном режиме ($I = \text{const}$):

$$E(A) = T \cdot I^2(A)$$

Минимизация $E(A)$ эквивалентна минимизации $|I(A)|$.

Значения функционала:

- $E(0) = 433$ усл. ед.²·с;
- $E(0,4) = 332$ усл. ед.²·с (на 23% меньше);
- $E(1) = 494$ усл. ед.²·с (на 49% больше оптимума).



График 4 – Изменение энергии

Динамическая модель переходных процессов

1. Модель изменения автоматизации при отказе

При отказе САУ уровень автоматизации падает по экспоненциальному закону:

$$A(t) = A_0 \cdot e^{(-t/\tau)}$$

где A_0 – начальный уровень автоматизации; τ – постоянная времени деградации системы [с]; t – время после отказа [с].

2. Энергетический функционал отказа

При $T_{\text{реакт}} = 60$ с: $E^{\text{да}}_{\text{и}} \approx 38,5$ усл. ед.²·с.

Моделирование типового профиля полета

Таблица 1 – Типовой профиль полета

Этап	A	I(A)	Интерпретация
Взлет	0,3	0,749	Высокая моторная нагрузка
Набор	0,7	0,787	Переходная зона
Крейсер	0,9	0,859	Максимум нагрузки
Снижение	0,6	0,764	Возврат к оптимальной зоне
Посадка	0,2	0,768	Повышение моторной активности

Ключевой вывод: максимум операторской нагрузки наблюдается на крейсерском этапе при $A = 0,9$, что значительно превышает оптимальный уровень $A_{\text{опт}} = 0,4$.

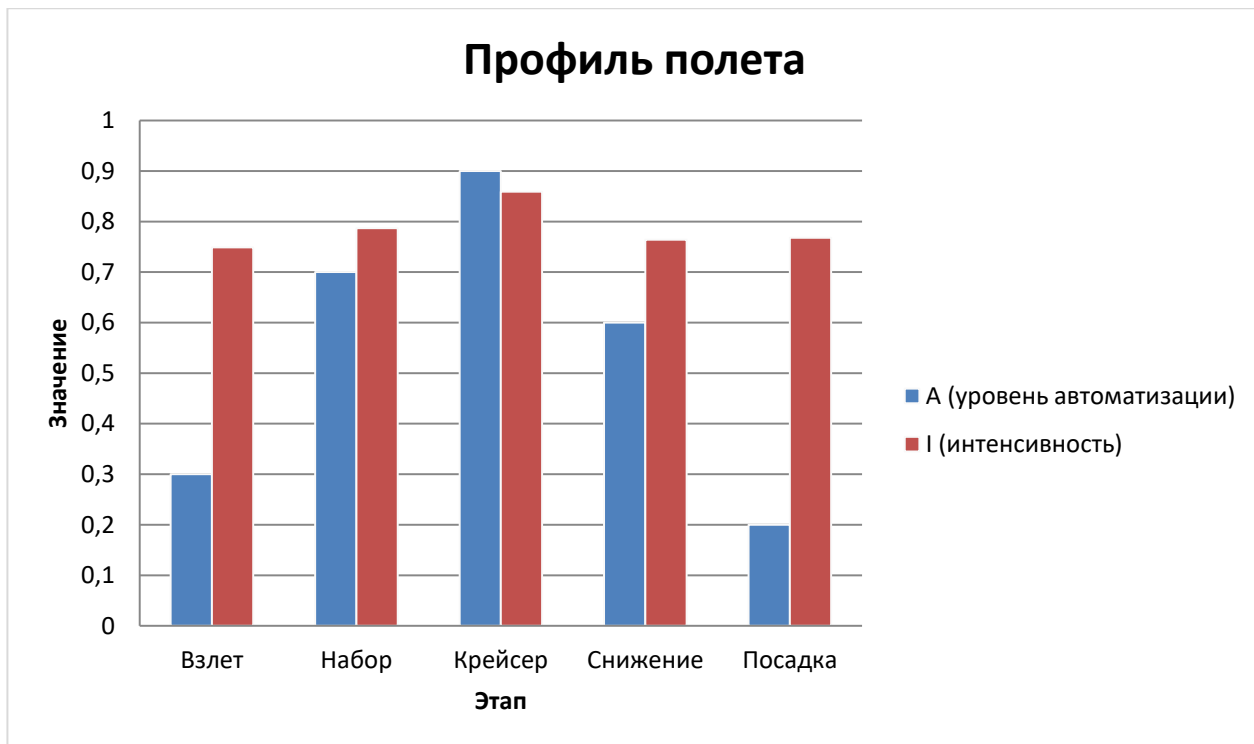


График 5 – Профиль полета

Параметрический анализ

При увеличении γ от 0,3 до 2,0: A_{opt} снижается с 0,63 до 0,32. При увеличении α от 1,0 до 4,0: A_{opt} возрастает с 0,29 до 0,38.

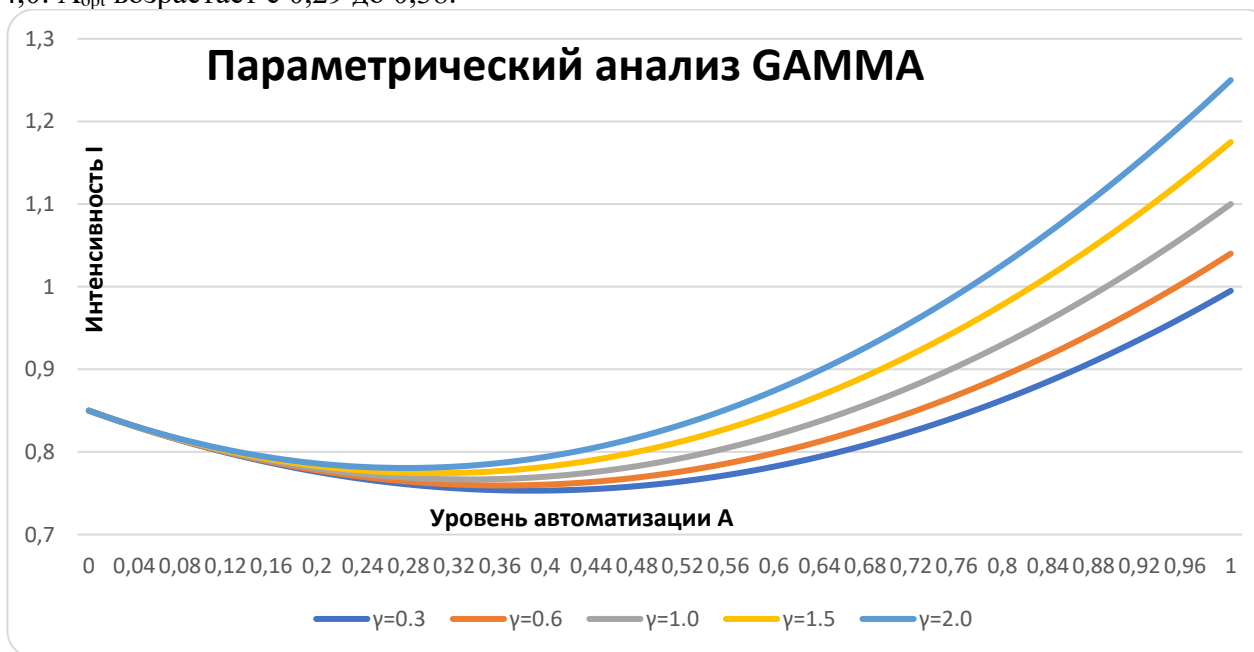


График 6 – Изменение GAMMA

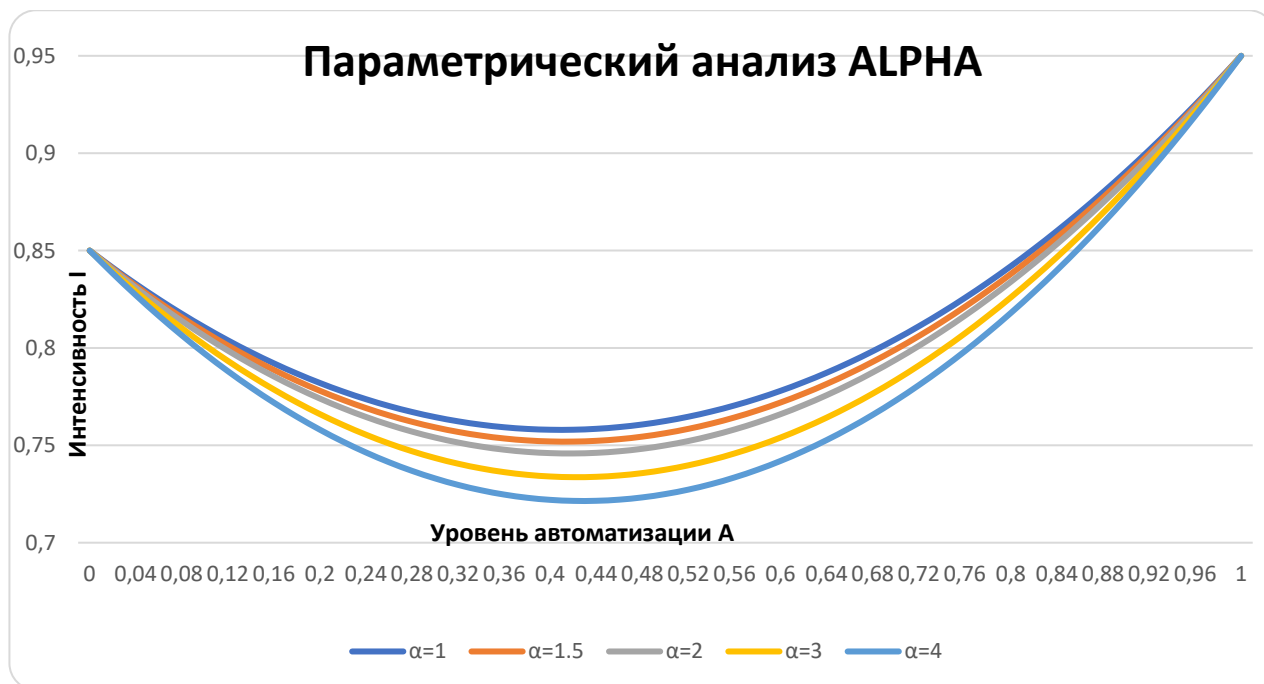


График 7 – Изменение ALPHA

Интегральный критерий для эксплуатанта

Предложен обобщенный критерий оптимизации с весовыми коэффициентами:

$$J(A) = w_1 \cdot [I(A)/I_n^m] + w_2 \cdot P_{\text{Err}}(A) + w_3 \cdot [E(A)/E_n^m]$$

где $w_1 + w_2 + w_3 = 1$ – безразмерные веса; I_n^m, E_n^m – номинальные значения.

Основные научные результаты

1. Разработана модель трансформации операторской деятельности.
2. Доказано существование оптимального уровня автоматизации и его единственность.
3. Численно установлено, что для типовых параметров $A_{\text{opt}} \approx 0,4$.
4. Доказано, что минимальная вероятность допущения ошибок сопутствуется с минимальной интенсивностью деятельности в полете.
5. Получено выражение для переходного процесса при отказе САУ.
6. Получен критерий оптимизации для эксплуатанта.

Заключение

Показано, что автоматизация не приводит к безоговорочному снижению нагрузки. Существует оптимальный уровень автоматизации $A_{\text{opt}} \approx 0,4$, обеспечивающий минимальную вероятность допущения ошибок.

Чрезмерная автоматизация ($A > 0,7$) увеличивает когнитивную нагрузку, что приводит к увеличению количества ошибок на 20–50%.

Внедрение автоматизированных систем положительно влияет на экономическое состояние авиапредприятий. Это происходит за счет снижения нагрузки на пилотов, что в свою очередь помогает уменьшить эксплуатационные издержки, благодаря минимизации рисков авиационных событий.

Список источников

1. Коваленко Г.В., Микинелов А.Л., Чепига В.Е. Летная эксплуатация: учебное пособие для вузов / под ред. Г.В. Коваленко. – М.: Машиностроение, 2007. – 414 с.
2. Пономаренко В.А., Ворона А.А., Лапа В.В. Стратегические направления решения проблемы человеческого фактора в военной авиации // Военная мысль. – 2017. – № 4. – С. 35–41.
3. Бодров В.А., Зараковский Г.М. Инженерно-психологические принципы оптимизации систем управления летательными аппаратами // Психологические основы

профессиональной деятельности: хрестоматия / сост. В.А. Бодров. – М.: ПЕР СЭ: Логос, 2007. – С. 797–802.

4. Бодров В.А., Лукьянова Н.Ф. Личностные особенности пилотов и профессиональная эффективность // Психология профессиональной деятельности: учебное пособие. – М.: ПЕР СЭ, 2007. – С. 423–429.

Сведения об авторах

Соколов Олег Аркадьевич, кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой №13 «Системы Автоматизированного Управления», Санкт-Петербургский государственный университет гражданской авиации имени Главного маршала авиации А.А. Новикова, Санкт-Петербург, Россия.

Дмитриев Сергей Андреевич, студент 4 курса, Санкт-Петербургский государственный университет гражданской авиации имени Главного маршала авиации А.А. Новикова, Санкт-Петербург, Россия.

Евсеев Владислав Валерьевич, студент 4 курса, Санкт-Петербургский государственный университет гражданской авиации имени Главного маршала авиации А.А. Новикова, Санкт-Петербург, Россия.

Information about the authors

Sokolov Oleg Arkadyevich, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Head of Department No. 13 “*Automated Control Systems*”, Saint Petersburg State University of Civil Aviation named after Chief Marshal of Aviation A.A. Novikov, Saint Petersburg, Russia.

Dmitriev Sergey Andreevich, 4th-year student, Saint Petersburg State University of Civil Aviation named after Chief Marshal of Aviation A.A. Novikov, Saint Petersburg, Russia.

Evseev Vladislav Valeryevich, 4th-year student, Saint Petersburg State University of Civil Aviation named after Chief Marshal of Aviation A.A. Novikov, Saint Petersburg, Russia.