

УДК 331.015

Технология анализа управляющих движений оператора эргатической системы

Ю.А. Кукушкин, ведущий научный сотрудник, профессор, д-р техн. наук

С.А. Айвазян, ведущий научный сотрудник, канд. техн. наук

А.С. Кузьмин, старший научный сотрудник, канд. техн. наук

Ю.В. Богданов, начальник отдела

А.А. Лукаш, научный сотрудник

Научно-исследовательский испытательный центр (авиационно-космической медицины и военной эргономики) 4 Центрального научно-исследовательского института Минобороны России, г. Москва

e-mail: kukushkina@gmail.com

Ключевые слова:
авиационная эргономика,
управляющие движения,
безопасность полетов,
эргатические системы.

Изложена технология анализа управляющих движений оператора эргатической системы и результаты ее использования в интересах эргономической экспертизы алгоритмов прицеливания при сбросе грузов с маневрирующего летательного аппарата, проведенных на полунатурном моделирующем комплексе.

1. Введение

Важным аспектом инженерно-психологических и эргономических исследований является оптимизация законов управления эргатическими системами с точки зрения психофизиологических возможностей оператора [1–8]. К числу показателей, наиболее полно характеризующих функциональную надежность оператора, относятся характеристики управляющих воздействий (УВ) оператора на органы управления эргатической системой при решении задач профессиональной деятельности [1–4, 8, 9]. Анализ моторного компонента деятельности — УВ на органы управления — важен по следующим причинам:

- во-первых, УВ характеризуют функциональную надежность профессиональной деятельности оператора и эффективность выполнения ее задач;
- во-вторых, УВ непосредственно связаны с процессами восприятия, анализа, переработки информации, существенно влияющими на структуру деятельности оператора.

Если восприятие приборной и неинструментальной информации является основой для формирования психологического образа профессиональной деятельности, то УВ отражают характер и качество

реализации программы действий и направлены на выдерживание заданных значений показателей функционирования эргатической системы и устранение (адаптивную компенсацию) отклонений от них.

Анализировать УВ целесообразно с позиций концепции физиологии активности Н.А. Бернштейна в той ее части, которая утверждает, что «...формирование навыка есть активная психомоторная деятельность» [9]. В результате этой деятельности формируется иерархия уровней регуляции — ведущего и фонового. По мнению Н.А. Бернштейна, ведущий уровень обеспечивает смысловую коррекцию действий, а фоновый — элементарные движения. Исходя из этих положений, УВ подразделяют на действия и движения.

Управляющее действие определяется как манипуляция оператором органом управления эргатической системой (руля, штурвала и т.п.) в интервале времени от момента его отклонения от нейтрального положения более чем на величину порога абсолютной чувствительности по отклонению до момента возвращения в исходное положение. Например, исследования показывают, что величина порога абсолютной чувствительности летчика по отклонению ручки управления самолета (РУ) составляет 2,5–3,5 мм, а по усилиям на РУ — 1,96–5,88 Н [2–4].

К *управляющим движениям* относятся реализации процесса отклонения оператором органа управления, заключенные между смежными точками, в которых значения скорости отклонения равны нулю, а амплитуда перемещения между ними превышает величину порога абсолютной чувствительности оператора по управлению.

В зависимости от назначения выделяют три группы управляющих действий: рабочие движения (РД), корректирующие движения (КД) и гностические движения (ГД).

Движения, связанные с перемещением органа управления, начинающиеся с его нейтрального положения или пересекающие его и выходящие за границу $\pm 1,5$ величины порога абсолютной чувствительности оператора по управлению, относятся к *рабочим*. В частности, рабочими являются высокоамплитудные движения летчика по манипуляциям с РУ, влияющие на динамику полета.

Движения, связанные с перемещением органа управления, начальное и конечное значение отклонения которых превышают $\pm 1,5$ величины порога абсолютной чувствительности оператора по управлению при условии непересечения нейтрального положения, относятся к *корректирующим*. Корректирующие движения регистрируются, как правило, в процессе выполнения рабочего движения и направлены на исправление ошибки или неточности их выполнения.

Движения, связанные с перемещением органа управления, с отклонениями от нейтрального положения, не выходящими за границу $\pm 1,5$ величины порога абсолютной чувствительности оператора по управлению, относятся к *гностическим*. Это малоамплитудные движения, не влияющие на динамику состояния управляемой эргатической системы.

Исходя из сказанного, рабочие и корректирующие движения относятся к ведущему уровню, а все остальные малоамплитудные движения, не влияющие на динамику состояния управляемой эргатической системы, — к фоновому.

Анализ управляющих воздействий оператора проводится структурными, статистическими и спектральными методами. Например, для летчика самолета обычно анализируются отклонения РУ в боковом (X_3) и продольном (X_6) каналах управления.

Ввиду того что процессы манипулирования органом управления эргатической системой нестационарные, необходимо методами цифровой фильтрации исключить из анализируемого процесса низкочастотный тренд и перейти к анализу стационарного случайного процесса.

2. Выбор методов фильтрации и параметров фильтра

Исключение низкочастотных составляющих — низкочастотного тренда, — обуславливающих нестационарность (по математическому ожиданию) процесса отклонения РУ, осуществляется цифровым фильтром верхних частот. Этот фильтр реализуется путем применения к исходному процессу отклонения органа управления эргатической системой (X_t) фильтра низких частот (вычисление низкочастотного тренда) (\tilde{X}_t) и затем вычитания результата низкочастотной фильтрации из исходного процесса.

Таким образом, цифровую фильтрацию исходного ряда дискретных отсчетов процесса X_t целесообразно проводить согласно преобразованиям:

$$Y_t = X_t - \tilde{X}_t,$$

где \tilde{X}_t — величина низкочастотного тренда в момент времени t , Y_t — отсчеты отфильтрованного процесса.

Цифровая низкочастотная фильтрация — это преобразование входного временного ряда X_t в выходной \tilde{X}_t с помощью линейного соотношения вида:

$$\tilde{X}_t = \sum_{l=-m}^m h_l X_{t-l},$$

где h_l — весовые коэффициенты, l — число членов фильтра.

Обычно используют симметричные фильтры, для которых $h_l = h_{-l}$. Для таких фильтров частотная характеристика равна [10]:

$$H(f) = h_0 + 2 \sum_{l=1}^m h_l \cos 2\pi f l \Delta, \quad -\frac{1}{2\Delta} \leq f \leq \frac{1}{2\Delta},$$

где Δ — интервал квантования процесса, X_t — отклонение органа управления эргатической системой. Наиболее часто используются косинусоидальный фильтр и фильтр «скользящего среднего». Эти фильтры просто реализуются на компьютере, обладают экономичностью, т.е. требуют небольшого числа членов фильтра для реализации заданных характеристик.

Для фильтра «скользящего среднего» значения весовых коэффициентов равны:

$$h_0 = 1; \quad h_l = h_{-l} = -\frac{1}{2m}, \quad l = \overline{1, m},$$

а его частотная характеристика имеет вид:

$$H(f) = 1 - \frac{1}{m} \sum_{l=1}^m \cos 2\pi f l \Delta.$$

Косинусоидальный фильтр имеет весовые коэффициенты [10]:

$$h_0 = 1 - \frac{1}{m+1}; \quad h_l = -\frac{1}{2(m+1)} \left(1 + \cos \frac{l\pi}{m+1}\right), \quad l = \overline{1, m}$$

и частотную характеристику следующего вида:

$$H(f) = \frac{m}{m+1} - \frac{1}{m+1} \sum_{l=1}^m \left(1 + \cos \frac{l\pi}{m+1}\right) \cos 2\pi f l \Delta.$$

Число членов фильтра m , определяющее частоту среза f_{cp} , на которой частотная характеристика фильтра $H(f) = 0,707$, выбирается из условия стационарности: плотность вероятности процесса не должна зависеть от времени. Выполнимость гипотезы о стационарности ряда можно проверить путем построения отдельных гистограмм для каждой из половин ряда: если эти гистограммы находятся в согласии, то предположение о независимости плотности вероятности от времени оправданно.

Проведенные исследования показали, что, в частности, при выполнении летчиком пилотирования и прицеливания условию стационарности удовлетворяют фильтры с частотой среза $f_{cp} < 0,1$ Гц. Число членов таких фильтров выбирается из неравенства:

- для косинусоидальных фильтров:
 $T_\phi = m\Delta \geq 6$;
- для фильтров «скользящего среднего»:
 $T_\phi = m\Delta \geq 3,5$,

где T_ϕ — «окно» фильтра.

Для интервала квантования $\Delta = 0,2$ с получаем, что потребное число членов косинусоидального фильтра $m \geq 30$, а для фильтра скользящего среднего $m \geq 18$.

Применительно к управлению летательными аппаратами получено, что для этапов полета с небольшими эволюциями (заход на посадку, установившийся вираж и др.) условию стационарности удовлетворяют фильтры с частотой среза $f_{cp} \leq 0,075$ Гц. Выполнение этого условия обеспечивается:

- для косинусоидальных фильтров:
 $T_\phi = m\Delta \geq 8$;
- для фильтров «скользящего среднего»:
 $T_\phi = m\Delta \geq 4,5$.

Приведенные данные показывают, что одну и ту же частоту среза фильтры «скользящего среднего» обеспечивают при меньшем числе членов фильтра (m), но частотная характеристика этого фильтра имеет перерегулирование с дальнейшим затуханием колебаний характеристики к значению, равному единице.

Исходя из вышесказанного, предпочтение в использовании следует отдавать косинусоидальному

фильтру, но в случае ограничений по длительности реализаций (реализации малой длительности) можно использовать фильтр «скользящего среднего». Если длина реализации получаемого экспериментального материала имеет малую продолжительность (менее 60 с), выбирается «фильтр скользящего среднего». При продолжительности экспериментальной выборки более 60 с выбирается косинусоидальный фильтр. После этого проводится анализ УВ.

Структурный анализ УВ направлен на выделение их составляющих (рабочих, корректирующих или гностических движений), вычисление их амплитудных, частотных и временных характеристик. Пример представления результатов структурного анализа показателей УВ летчика приведен в табл. 1.

В результате статистического анализа УВ летчика получают оценки математического ожидания и среднеквадратичного отклонения для следующих величин: отклонения РУ, скорости перемещения РУ, а также мощности, расходуемой летчиком на перемещение ручки управления самолета. Величина мощности, затрачиваемой на перемещение РУ, определяется по формуле:

$$W = FV = kXV,$$

где F — усилие, прилагаемое для перемещения РУ, V — скорость перемещения РУ, k — коэффициент пропорциональности, X — отклонение РУ.

Спектральные показатели и индексы описывают волновую структуру динамического ряда значений характеристики состояния. Анализ спектральной плотности процесса отклонения РУ позволяет получить информацию о распределении мощности процесса в зависимости от их частоты.

В результате спектрального анализа получается сглаженная выборочная нормированная спектральная плотность УВ летчика [4]:

Таблица 1

Показатели	Характеристика УВ летчика				Действия
	Движения				
	Всего	Рабочие	Корректирующие	Гностические	
Частота движений и действий f , 1/мин	9,2	1,5	0	7,6	3,8
Средняя амплитуда A , мм	5	7,7	0	4,4	3,9
Средняя продолжительность движений и действий T , с	0,6	0,7	0	0,6	0,3
Доля видов УВ летчика в общем их количестве, %	100	17	0	83	—

$$C(f) = 2\Delta t \left[1 + 2 \sum_{k=1}^{s-1} r(k)w(k) \cos 2\pi f k \right], \dots \quad 0 \leq f \leq \frac{1}{2} \Delta t,$$

где $r(k)$ — выборочная оценка автокорреляционной функции, s — число точек отсечения автокорреляционной функции, $w(k)$ — веса корреляционного окна.

Выборочная оценка автокорреляционной функции получается из выражения:

$$r(k) = \frac{1}{\sigma(n-k)} \sum_{t=1}^{n-k} (X_t - M)(X_{t+k} - M),$$

где σ — оценка среднеквадратичного отклонения процесса X_p , M — оценка математического ожидания процесса X_p , n — число отсчетов ряда X_t .

При вычислении $C(f)$ целесообразно использовать корреляционное окно Тьюки, поскольку оно обеспечивает небольшие боковые лепестки на зависимости $w(k)$ и дает возможность получить заданную ширину полосы частот при минимуме вычислений:

$$w(k) = \begin{cases} \frac{1}{2} \left(1 + \cos \frac{2\pi k}{s} \right), & k < s-1 \\ 0, & k \geq s-1 \end{cases}.$$

Ширину полосы частот окна Тьюки следует выбирать на основании рекомендаций, изложенных в [2, 4]. Для сигнала УВ летчика она должна быть равна 0,11 Гц. Тогда число точек отсечения s можно найти из неравенства:

$$1,33 / s\Delta t \leq 0,11.$$

Количественная оценка спектра УВ летчика производится по величинам:

- дисперсии;
- отношения мощностей основной (P_o) и поисковой (P_{Π}) составляющих спектра:

$$k_p = \frac{P_o}{P_{\Pi}}, \quad \text{где } P_o = \int_0^{0,3} c(f)df, \quad P_{\Pi} = \int_{0,3}^1 c(f)df;$$

- отношения максимумов мощностей (k_a) в частотных областях спектра: основной (0–0,3 Гц) — $f_{o\max}$ и поисковой (0,3–1 Гц) — $c(f_{n\max})$:

$$k_a = c(f_{o\max})/c(f_{n\max});$$

- частот максимума основной составляющей спектра $f_{o\max}$ и $f_{n\max}$.

Структурный и статистический анализ не являются полностью независимыми, они взаимно дополняют друг друга, а в ряде случаев характеризуют одну и ту же сторону процесса.

Для получения оценок спектра УВ с достаточно узкими доверительными интервалами необходимо иметь реализации процесса длительностью 1–3 мин. Структурный анализ можно применять и для более коротких реализаций, кроме того, он дает более устойчивые результаты при наличии шумов вследствие их фильтрации в диапазоне амплитуд, не превышающих порог чувствительности.

Рассмотренные методы анализа УВ оператора эргатической системы позволяют проводить сравнительные эргономические исследования, направленные на выбор алгоритмов управления, оптимальных с точки зрения психофизиологических возможностей оператора. Негативным (для надежности деятельности оператора и безопасности эксплуатации эргатической системы) является увеличение частоты УВ оператора и интенсивности манипуляций органами управления эргатической системой, что приводит к перераспределению спектра УВ в область высоких частот и к появлению ярко выраженной поисковой составляющей с уменьшением соотношения мощностей основной и поисковой составляющих спектра [5, 11]. Указанные особенности свидетельствуют о выраженном психофизиологическом напряжении оператора и снижении его резервных возможностей и, следовательно, о высоком риске опасных ошибочных действий.

3. Сравнительный эргономический анализ алгоритмов прицеливания летчика

Для выбора алгоритмов прицеливания, реализуемых летчиком при сбросе грузов в точку земной поверхности с маневрирующего летательного аппарата, максимально удовлетворяющих психофизиологическим возможностям летчика, проведены экспериментальные эргономические исследования. Исследования проводились на полунатурном моделирующем комплексе, позволяющем воспроизводить деятельность летчика маневренного самолета при сбросе грузов в точку земной поверхности с маневрирующего летательного аппарата; при этом интервал квантования перемещений РУ ($\Delta РУ$) принят равным 3 мм. Сравнивались заходы на цель с использованием двух алгоритмов прицеливания, обозначенных С1 и С2. В алгоритме С1, в отличие от алгоритма С2, отсутствует модуль адаптивного прогнозирования положения летательного аппарата.

С помощью полунатурного моделирующего комплекса реализованы прицеливания на наземную цель

Таблица 2

Характеристики УВЛ на РУ в боковом канале управления самолетом

Характеристика		σ_{py} , мм	\bar{V}_{py} , мм/с	P_{py} , Вт	f_{py} , 1/мин	A_{py} , мм
Цель прямо						
$M \pm m$	алгоритм С1	4,2±0,5	6,3±0,5	41,6±8,6	31,5±2,1	10,3±0,6
	алгоритм С2	2,7±0,2	3,9±0,3	14,9±2,1	22,5±1,8	7,8±0,5
M_1/M_2 , %		156%	161%	279%	140%	132%
p		$p < 0,01$	$p < 0,01$	$p < 0,01$	$p < 0,01$	$p < 0,01$
Цель справа						
$M \pm m$	алгоритм С1	4,0±0,4	5,3±0,5	26,9±5,1	30,4±1,8	9,0±0,6
	алгоритм С2	3,3±0,5	4,3±0,6	21,3±6,4	25,4±2,6	8,0±0,6
M_1/M_2 , %			123%	126%	120%	113%
p			$p > 0,05$	$p > 0,05$	$p > 0,05$	$p > 0,05$
Цель слева						
$M \pm m$	алгоритм С1	4,4±0,4	6,2±0,6	36,9±5,3	29,9±1,9	11,1±0,7
	алгоритм С2	3,8±0,3	5,6±0,5	31,2±4,1	30,2±2,3	10,1±0,8
M_1/M_2 , %			111%	127%	99%	110%
p			$p > 0,05$	$p > 0,05$	$p > 0,05$	$p > 0,05$

Примечание: σ_{py} – среднее квадратичное (стандартное) отклонение РУ, \bar{V}_{py} – средняя скорость движения РУ, P_{py} – мощность на перемещение РУ, f_{py} – частота движений РУ, A_{py} – амплитуда движений РУ, M – оценка среднего арифметического значения, m – оценка ошибки среднего арифметического значения (стандартная ошибка), p – уровень статистической значимости гипотезы о равенстве средних арифметических значений показателей для алгоритмов С1 (M_1) и С2 (M_2), проверяемой по критерию Манна–Уитни.

(точку сброса грузов) с заданной высоты и на заданной скорости полета по каждому алгоритму при условиях: цель прямо, цель слева и цель справа. Всего с участием 4 опытных летчиков было симулировано 120 заходов на цель: по 20 заходов по каждому алгоритму и условию.

Анализ УВ летчика (УВЛ) проводился по разработанным алгоритмам структурного и спектрального анализа. Результаты обработки УВЛ в интересах сопоставления алгоритмов прицеливания С1 и С2 представлены в табл. 2 и 3.

Сравнение алгоритмов прицеливания С1 и С2 по результатам спектрального анализа УВЛ показало (табл. 2 и 3), что при прицеливании (цель прямо) с использованием алгоритмов прицеливания С1 по сравнению с С2 имеется перераспределение спектра в боковом канале управления в область высоких частот: появились выраженные пики поисковой составля-

ющей. Анализ УВЛ показал, что прицеливание (цель прямо) с использованием алгоритмов прицеливания С1 по сравнению с С2 имеет перераспределение спектра в боковом канале управления в область высоких частот: появились выраженные пики поисковой составляющей.

Таблица 3

Характеристики УВ летчика на РУ в продольном канале управления самолетом

Характеристика		σ_{py} , мм	\bar{V} , мм/с	P_{py} , Вт	f_{py} , 1/мин	A_{py} , мм
Цель прямо						
$M \pm m$	алгоритм С1	4,9±0,5	6,5±0,7	35,4±6,0	31,9±2,7	9,4±0,6
	алгоритм С2	4,4±0,4	5,1±0,5	24,5±3,8	26,9±3,8	8,6±0,4
M_1/M_2 , %			127%	144%	119%	109%
p			$p > 0,05$	$p > 0,05$	$p > 0,05$	$p > 0,05$
Цель справа						
$M \pm m$	алгоритм С1	6,1±0,5	6,3±0,8	37,8±7,2	30,6±2,3	10,0±0,9
	алгоритм С2	5,4±0,5	4,6±0,4	23,6±4,3	23,9±1,8	9,2±0,7
M_1/M_2 , %			137%	160%	128%	109%
p			$p > 0,05$	$p > 0,05$	$p < 0,05$	$p > 0,05$
Цель слева						
$M \pm m$	алгоритм С1	6,9±0,4	6,8±0,6	41,6±5,2	33,1±2,7	10,7±0,5
	алгоритм С2	6,1±0,5	5,1±0,4	32,1±5,9	22,8±1,7	10,9±1,0
M_1/M_2 , %			133%	130%	145%	98%
p			$p < 0,05$	$p > 0,05$	$p < 0,01$	$p > 0,05$

Примечание: см. примечание к табл. 2.

ющей, уменьшилось соотношение мощностей основной и поисковой составляющих спектра (1,0 против 1,5) и соотношение максимумов основной и поисковой составляющих спектра (2,0 против 2,8). При прицеливании (цель прямо) в продольном канале управления существенных отличий в спектрах не выявлено. Не наблюдается существенных отличий в спектрах при заходе на цель справа и на цель слева.

Выявленные различия свидетельствуют о том, что прицеливание по С1 без использования прогностической информации вызывает большие затруднения у летчика, чем прицеливание по С2, поэтому алгоритм С2 является оптимальным с точки зрения соответствия психофизиологическим возможностям летчика.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ломов Б.Ф. Человек и техника (очерки инженерной психологии). — Л., 1963.
2. Пономаренко В.А. Психология человеческого фактора в опасной профессии. — Красноярск: издательство Поликом, 2006.
3. Ушаков И.Б., Богомолов А.В., Кукушкин Ю.А. Паттерны функциональных состояний оператора. — М.: Наука, 2010.
4. Ушаков И.Б., Кукушкин Ю.А., Богомолов А.В. Физиология труда и надежность деятельности человека. — М.: Наука, 2008.
5. Гузий А.Г., Богомолов А.В., Кукушкин Ю.А. Теоретические основы функционально-адаптивного управления системами «человек—машина» повышенной аварийности // Мехатроника, автоматизация, управление. — 2005. — № 1. — С. 39—48.
6. Ушаков И.Б., Пономаренко В.А., Кукушкин Ю.А., Богомолов А.В. Автоматизированные системы для контроля состояния специалистов опасных профессий. — М.: Новые технологии, 2005.
7. Ушаков И.Б., Богомолов А.В., Кукушкин Ю.А. Методологические аспекты динамического контроля функциональных состояний операторов опасных профессий // Медико-биологические и социально-психологические проблемы безопасности в чрезвычайных ситуациях. — 2010. — № 4. — Ч. 2. — С. 6—12.
8. Ушаков И.Б., Богомолов А.В., Гридин Л.А., Кукушкин Ю.А. Методологические подходы к диагностике и оптимизации функционального состояния специалистов операторского профиля. — М.: Медицина, 2004.
9. Бернштейн Н.А. Физиология движений и активность. — М.: Наука, 1990.
10. Дженкинс Г. Спектральный анализ и его приложения. Т. 1, 2. — М.: Мир, 1971, 1972.
11. Федоров М.В. Технология планирования многофакторных экспериментальных исследований и построения эмпирических моделей комбинированных воздействий факторов на операторов эргатических систем // Информационно-измерительные и управляющие системы. — 2010. — № 5. — С. 44—49.

5. Заключение

Анализ управляющих движений оператора должен быть неотъемлемой частью полунатурных эргономических исследований, поскольку его результаты позволяют обеспечить адекватный учет психофизиологического состояния и резервных возможностей оператора эргатической системы при реализации функций управления ее функционированием. Это, в свою очередь, позволяет разработать и своевременно реализовать комплекс мероприятий, направленных на обеспечение должной функциональной надежности профессиональной деятельности оператора эргатической системы и безопасности ее эксплуатации.

Работа поддержана РФФИ, грант № 13-01-00176.

Analysis Technology of Ergatic System Operator's Control Movements

Yu.A. Kukushkin, Leading Research Associate, Professor, Doctor of Engineering, Research and Testing Center of Aerospace Medicine and Military Ergonomics, 4th Central Research Institute of Ministry of Defense of the Russian Federation, Moscow
S.A. Aivazian, Leading Research Associate, Ph.D. of Engineering, Research and Testing Center of Aerospace Medicine and Military Ergonomics, 4th Central Research Institute of Ministry of Defense of the Russian Federation, Moscow
A.S. Kuz'min, Senior Research Associate, Ph.D. of Engineering, Research and Testing Center of Aerospace Medicine and Military Ergonomics, 4th Central Research Institute of Ministry of Defense of the Russian Federation, Moscow
Yu.V. Bogdanov, Head of Department, Research and Testing Center of Aerospace Medicine and Military Ergonomics, 4th Central Research Institute of Ministry of Defense of the Russian Federation, Moscow
A.A. Lukash, Researcher, Research and Testing Center of Aerospace Medicine and Military Ergonomics, 4th Central Research Institute of Ministry of Defense of the Russian Federation, Moscow

Analysis technology of ergatic system operator's control movements and results of its use in the interests related to ergonomic expertise of aiming algorithms at discharge a cargo from maneuvering aircraft, conducted on-loop modeling complex is presented.

Keywords: aviation ergonomics, control movements, flight safety, ergatic systems.