

УДК 656.7.071:658

ББК 74.570.22

**МЕТОДИКИ РАСЧЕТА ВЕСОВЫХ КОЭФФИЦИЕНТОВ ПРИ
РЕАЛИЗАЦИИ АЛГОРИТМОВ ОЦЕНКИ УРОВНЯ
НАТРЕНИРОВАННОСТИ КУРСАНТОВ ЛЕТНЫХ УЧИЛИЩ**

Павел Сергеевич Назаров

Государственный университет гражданской авиации

Санкт-Петербург, Россия

nazps@yandex

Владимир Валентинович Устинов

Московский государственный технический университет

гражданской авиации (Иркутский филиал)

Иркутск, Россия

ustinov_1956@mail.ru

В работе предложены методики и алгоритмы расчета весовых коэффициентов, используемых при оценивании уровня натренированности курсантов летных училищ с учетом количества выполняемых упражнений и качества их выполнения, а также весовых коэффициентов значимостей параметров полета, входящих в алгоритм оценки техники пилотирования, и значимостей элементов полета, входящих в заданное упражнение.

Ключевые слова: безопасность полетов, натренированность летного состава, весовые коэффициенты значимостей альтернатив.

METHODS OF CALCULATION OF WEIGHT COEFFICIENTS AT IMPLEMENTATION OF LEVEL ESTIMATION ALGORITHMS OF FLIGHT SCHOOL CADETS TRAINING

Pavel Sergeevich Nazarov

Saint Petersburg State University of Civil Aviation,

Saint-Petersburg, Russia

nazps@yandex

Vladimir Valentinovich Ustinov

Irkutsk Branch of Moscow State Technical University

of Civil Aviation, Irkutsk, Russia

ustinov_1956@mail.ru

The methods and algorithms of calculation of weight coefficients used for estimation of training level of flight school cadets with account of the number of exercises and quality of their performance are offered. Weight coefficients of significance of flight parameters included in the algorithm of estimation of piloting technique and significance of flight elements included in the given exercise are considered.

Keywords: flight safety, flight crew training, weight coefficients of alternative significance.

Подготовка курсантов летных училищ – это сложная задача, от успешного решения которой непосредственно зависит безопасность полетов. Проверка техники пилотирования – это метод определения степени соответствия объема и количества знаний, навыков, умений пилота требованиям предстоящих учебных или производственных летных заданий.

При расчете коэффициента натренированности необходимо учитывать количество выполненных упражнений и качество их выполнения. При этом, если упражнения, заданные в программе летной подготовки, выполнены с

оценкой «отлично», коэффициент натренированности будет равен условному значению «1».

Растренированность определяется только перерывами в летной подготовке.

Один из примеров количества выполняемых упражнений по программе летной подготовки показан в таблице 1.

Таблица 1 – Пример программы летной подготовки

№ упражнения	НАИМЕНОВАНИЕ УПРАЖНЕНИЯ	Количество полётов
1.	Вывозной (контрольный) полет по кругу	10
2.	Вывозной (контрольный) полет в зону на средней и большой высоте	7
3.	Полет по кругу	8
4.	Полет в зону на средней и большой высоте	5
5.	Вывозной (контрольный) полет в зону на малой высоте	3

Известно, что процесс освоения каких-либо навыков подчиняется показательному закону распределения [Устинов, 2011; Устинов, 2020]

$$K_n = K_0 + (1 - e^{-aCn}).$$

Будем полагать, что начальная подготовка курсанта минимальна $K_0 = 0,05$ и определяет только уровень теоретических знаний и возможностей использования тренажера.

Текущее изменение коэффициента натренированности K_n будет возрастать при условии выполнения большего количества повторов упражнения, заданного программой летной подготовки «n» и качеством выполнения упражнения по пятибалльной шкале $C=0,5$.

Главной задачей является определение значения коэффициента «а», который численно будет соответствовать полной программе повторов выполненных упражнений с оценкой отлично, т.е. $K_n = 1$. Если упражнение выполнено на оценку ниже, то соответственно коэффициент

натренированности K_H будет ниже уровня «1», и курсанту могут потребоваться дополнительное количество выполнения заданного упражнения или тренировка на авиационном тренажере.

Уменьшение K_H определяется только интервалом времени перерыва в летной подготовке:

$$K_H(t) = K_H(t_0) \times e^{-b(t-t_0)},$$

где b – определяемый коэффициент;

t – текущий (заданный) момент времени.

Единственной информацией о качественных характеристиках полета являются оценки, выставляемые за выполненное упражнение.

Анализ коэффициентов a и b позволяет осуществить контроль за ходом отработки элементов летной подготовки с учетом качества техники пилотирования, прогнозировать уровень натренированности на заданный момент времени, более эффективно формировать план летной подготовки авиационного полка.

В работе рассмотрена методика расчёта весовых коэффициентов натренированности лётного состава «а» и натренированности «b».

Для расчетов вводятся следующие требования:

- коэффициент натренированности K_H будет равен значению «1» только в случае выполнения упражнения с оценкой «отлично»;
- так как курсант имеет незначительные знания, примем начальный коэффициент $K_0 = 0.05$;
- для расчетов будем полагать, что все полеты выполнялись с оценкой «отлично» ($C=5$);
- для примера введем требуемое количество повторов заданного упражнения $n=5$.

Решаем уравнение относительно коэффициента «а»:

$$a = -\frac{\ln 0.05}{25} = 0.12.$$

Тогда исходное уравнение натренированности при полученных значениях: $K_0=0.05$, $c=5$, $a=0.12$, $n=1$ определяются следующими шагами:

Дальнейшие расчеты проводятся по формулам:

$$K_{H1} = 0.05 + (1 - e^{-5 \times 0.12 \times 1}) = 0.05 + (1 - e^{-0.6}) = 0.05 + (1 - 0.55) = 0.5$$

$$K_{H2} = 1 - e^{-5 \times 0.12 \times 2} = 1 - e^{-1.2} = 1 - 0.3 = 0.7$$

$$K_{H3} = 1 - e^{-5 \times 0.12 \times 3} = 1 - e^{-1.8} = 1 - 0.17 = 0.83$$

$$K_{H4} = 1 - e^{-5 \times 0.12 \times 4} = 1 - e^{-2.4} = 1 - 0.09 = 0.91$$

$$K_{H5} = 1 - e^{-5 \times 0.12 \times 5} = 0.05 + (1 - e^{-3}) = 1 - 0.05 = 0.95 \approx 1.$$

Данные значения коэффициентов и методика расчета K_H с учетом K_0 , n и C заносятся в программу расчета.

Согласно общепринятым показателям коэффициент растренированности определяется формулой [Устинов, 2020]:

$$K_p = e^{-bt}.$$

Для принятых ранее условий значения $K_p=0.05$, $T=15$ дней, исходное уравнение будет иметь вид:

$$0.05 = e^{-15b}.$$

$$b = -\frac{\ln 0.05}{15} = 0.2.$$

В дальнейшем предполагается применять для летного состава, имеющего различный класс подготовки, при этом учитывать период отпусков, больничных, метеоусловий и т.д.

Наглядно пример оценивания уровня натренированности поясняется графиком, представленным на рисунке 2, где вертикальными линиями представлен участок, характеризующий степень обученности, а участок со спадающей экспонентой – ослабление навыков.

Действующие нормативные документы, в том числе руководству по летной эксплуатации самолета Як-130, определяют объективные данные бортовых регистраторов в качестве основного источника информации при оценке техники пилотирования для управления процессом подготовки.

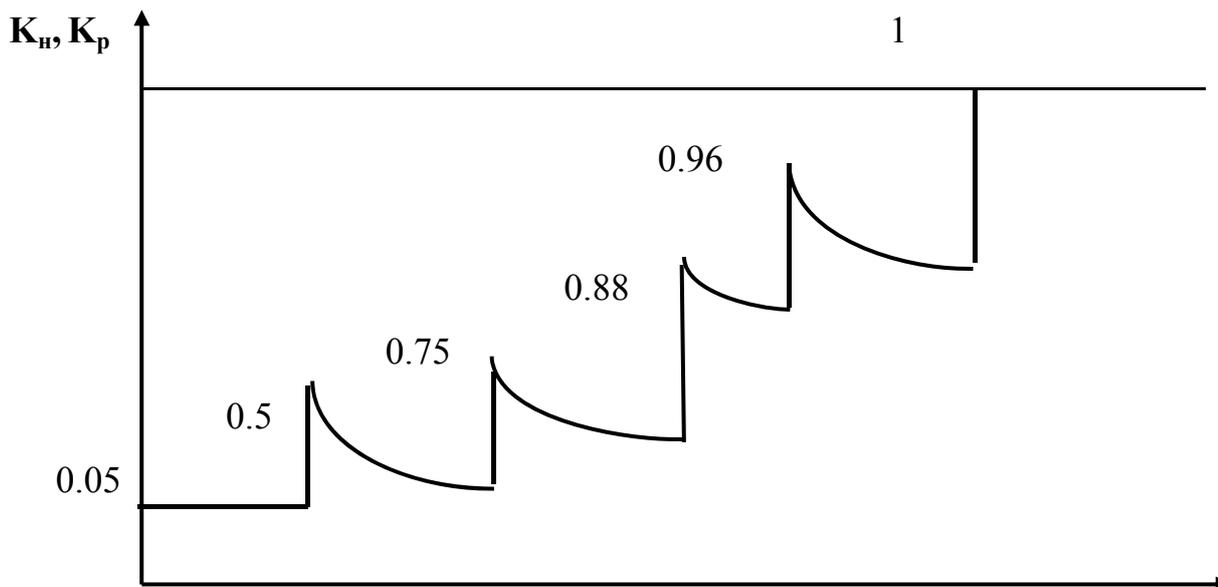


Рисунок 2 – График учета коэффициента натренированности

Дефицит располагаемого времени на принятие решения приводит к упрощению анализа и потере информации, необходимой для принятия решения. Следствием этого являются ошибки управления процессом подготовки. Это, в свою очередь, приводит к снижению эффективности подготовки. Кроме того, ошибки управления процессом подготовки неизбежно приводят к нерациональному использованию материально-технических ресурсов части и вызывают снижение уровня безопасности полета.

В данной работе использован статистический метод балльного оценивания качества техники пилотирования. Такой подход достаточно прост и обоснован целым рядом исследований.

За эталонные значения параметров принимаются математическое ожидание, среднеквадратическое отклонение и корреляционная матрица C , вычисленные при достаточном числе реализаций заданного элемента полета, выполненного летчиками высокого уровня подготовки.

В большинстве случаев, параметры, характеризующие качество выполнения этого элемента, подчинены нормальному закону распределения, плотность вероятности которого определяется общим выражениями для одномерного и многомерного распределений [Вентцель, 2006]:

$$F(x_i) = \frac{1}{\sigma_i \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x_i - \bar{x}_i)^2}{2\sigma_i^2}}, i = \overline{1, n},$$

$$f(x_1, x_2, \dots, x_n) = \sqrt{|C|} \cdot \left(2\pi\right)^{-\frac{n}{2}} e^{-\frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n C_{ij} (x_i - m_{x_i})(x_j - m_{x_j})}$$

Анализ применения закона позволяет определить упрощенный критерий оценки качества техники пилотирования, который может быть выражен формулой [Кибардин, Кашковский, Устинов, Шишкин, 1999; Кашковский, 2013; Добрынин, 2014; Устинов, 2020]

$$X_0^T M^{-1} X_0 \leq G(t)$$

Работа предложенного критерия оценки техники пилотирования подробно изложена в работе [Устинов, 2020]. В каждом конкретном случае, при анализе определенных элементов полета, параметры оценивания имеют разные весовые коэффициенты, поэтому возможно применение алгоритма оценивания с учетом их значимостей. Тогда критерий примет вид

$$(KX_0^T)M^{-1}(KX_0) \leq R(t).$$

В решаемой задаче оценивания техники пилотирования для расчета относительных коэффициентов значимостей параметров полета или фигур пилотажа использован метод экспертного опроса (метод попарного сравнения) [Евланов, Кутузов, 1982; Бешелев, Гурвич, 1980].

Оттиск применяемой для экспертного опроса карты приведен на рисунке 3.

КАРТА ЭКСПЕРТНОГО ОПРОСА

Для определения коэффициента важности параметров, характеризующих качество выполнения ВПРАКА. Ранжирование параметров проводится с целью выявления влияния каждого из них на оценивание качества техники пилотирования в соответствии с требованиями точности поддержания значений параметров и безопасности полёта.

	P 6602	H 6602	V 6602	P тек.	H тек.	V тек.	V _г	n _г	δ	α	

ИНСТРУКЦИЯ ПО ЗАПОЛНЕНИЮ

Сравните между собой попарно параметры полёта, которые расположены в вертикальной и горизонтальной строках, отвечая при этом на вопрос: "Какой из элементов значительнее (важнее) при оценивании техники пилотирования?" Если предпочтение отдано показателю, расположенному в горизонтальной строке, то в клетке на пересечении строк поставьте "1", в противном случае "0", при их равенстве поставьте "0,5". Если вы сможете предложить другие параметры для оценивания, то внесите их в пустующие строки и столбы по аналогии с имеющимися в таблице.

Рисунок 3 – Карта экспертного опроса

Имеется «n» объектов (параметры, маневры и фигуры): a_1, a_2, \dots, a_n . М экспертов проводят сравнение всех пар объектов между собой, давая численную оценку:

$$W_{ij} = \begin{cases} 1, \text{ если } a_i \succ a_j; i \neq j, i = \overline{1, n}, j = \overline{1, n} \\ 0, \text{ если } a_i \prec a_j; i \neq j, i = \overline{1, n}, j = \overline{1, n}; \\ 0,5, \text{ если } a_i \sim a_j; i = \overline{1, n}; \end{cases}$$

Если при оценке пар альтернатив (a_i, a_j) m_1 -экспертов групп высказались в пользу предпочтения $a_i \succ a_j$, m_2 -экспертов – наоборот, а m_k экспертов за $a_i \sim a_j$ (их эквивалентность), то оценка М.О. случайной величины определяется выражением:

$$X_{ij} = M[w_{ij}] = 1 \frac{m_i}{m} + 0 \frac{m_j}{m} + 0,5 \frac{m_k}{m};$$

Из этого следует:

$$x_{ij} = \frac{m + 0,5mk}{m}; i = \overline{1, n}; n = \overline{1, n}; k = \overline{1, n}; i \neq j.$$

Совокупность x_{ij} образует матрицу размерностью $n \times n$. Вектор коэффициентов относительной важности (КОВ) порядка M определяется:

$$K^M = \frac{1}{\lambda^M} X K^{M-1}; M = \overline{1, n}; \text{ где } X = |X_{ij}|; K^0 = (1, 1 \dots 1);$$

$$K^M = (k_1^m, k_2^m \dots k_n^m);$$

$$\lambda^M = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n X_{ij} k_j^{M-1}.$$

В решаемой задаче ограничимся нахождением КОВ первого порядка, что дает достаточную точность и значительно упрощает все вычисления.

Достоверность полученных результатов определяется с помощью коэффициента конкордации W , характеризующего согласованность мнений экспертов.

$$W = \frac{1}{12m^2} (n^3 - n) - m \sum_{j=1}^m R_j,$$

где m – количество экспертов;

n – количество ранжируемых альтернатив;

R_j – определяет количество одинаковых рангов в j -ом ряду.

Методика расчета весовых коэффициентов значимостей элементов полета в упражнении основана на применении метода сингулярного разложения, так как обычные методы решения систем линейных уравнений с незначительными изменениями числовых характеристик могут привести к вырожденности матриц и ошибкам при вычислении. Пусть матрица A размерностью $[m, n]$ представляет собой значения балльных оценок за элементы полета в упражнении, а матрица b , размерностью $[m, 1]$ – общие оценки за упражнение. Данные могут быть взяты из летных книжек. Тогда для определения весовых

коэффициентов решается уравнение вида

$$Ax = b.$$

Решение поставленной задачи обычными методами результатов не дало из-за вырожденности матрицы A . Поэтому предлагается использовать метод сингулярного разложения (SVD) [Форсайт, Малькольм, Моулер, 1980].

Функциональное назначение программы MINKV состоит из 2-х основных частей:

- головная программа;
- подпрограмма SVD.

В общем виде ставится задача решения системы уравнений вида [Устинов, 2020]:

$$Ax = b,$$

где A – матрица коэффициентов размерностью $m \times n$; b – матрица правых частей размерностью $m \times 1$.

Для решения этой системы исходная матрица A преобразуется к виду [Форсайт, Малькольм, Моулер, 1980; Устинов, 2020]:

$$A = U \Sigma V^T$$

где U – ортогональная $m \times m$ матрица; V – ортогональная $n \times n$ матрица; Σ – диагональная $m \times n$ матрица, у которой $\sigma_{ij} = 0$ при $i \neq j$ и $\sigma_{ij} = \sigma_i \geq 0$.

Величины σ_i называют сингулярными числами A , а столбцы U и V – левыми и правыми сингулярными векторами.

Разработанная авторами подпрограмма SVD предназначена для вычисления матриц U , V , Σ . В головной программе решается система уравнений $U \Sigma V^T x = b$ по следующей схеме.

Сначала путем замены переменных исходную матрицу заменяют на типовую:

$$\Sigma Z = b,$$

где $Z = V^T x$; $d = U^T b$.

Т.к. система $\sum Z = b$ – диагональная, то может быть легко решена:

$$\sigma_j Z_j = d_i \text{ при } j \leq n \text{ и } \sigma_j \neq 0$$

$$0Z_j = d_i \text{ при } j \leq n \text{ и } \sigma_j = 0$$

$$0 = d_i \text{ при } j > n.$$

Решение системы существует только в случае, когда $d_i=0$, при $\sigma_j=0$ или $j >$

n , т.е., если:

$$\sum = \begin{bmatrix} \sigma_{11} & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_{22} & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \rightarrow \sigma = 2,$$

$$d = U^T b = \begin{bmatrix} d_1 \\ d_2 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \rightarrow d = 2.$$

Значения $Z_j = d_j / \sigma_j$.

Т.к. известны Z и V , можно определить и неизвестные x исходные уравнения:

$$Ax = b,$$

$$x = VZ.$$

Библиографический список

1. *Бешелев С. Д.* Математико-статистические методы экспертного оценивания / С. Д. Бешелев, Ф. Г. Гурвич. М.: Статистика, 1980. 263 с.
2. *Вентцель Е. С.* Теория вероятностей: учеб. пособие для вузов. 10-е изд. М.: Высш. шк., 2006. 575 с.
3. *Добрынин Н. А.* Один из подходов к разработке программного модуля оценки качества пилотирования с использованием программно-аппаратного комплекса «Монстр». Актуальные вопросы исследований в авионике: теория, обслуживание, разработки / Н. А. Добрынин, В. В. Устинов // Сб. тезисов докл. Всероссийской научно-практической конференции «Авиатор», Воронеж, 12-14 февраля 2014 г. Воронеж: ВУНЦ ВВС «ВВА», 2014. С. 185-187.
4. *Евланов Л. Г.* Экспертные оценки в управлении / Л. Г. Евланов, В. А. Кутузов. М.: Экономика, 1982. 133 с.

5. *Кашковский В. В.* Методика объективной оценки профессиональной подготовленности летного состава маневренных самолетов / В. В. Кашковский, В. В. Устинов // Научный вестник Московского государственного технического университета гражданской авиации. 2013. № 187. С. 161-163.

6. *Кибардин Ю. А.* Устройство для оценки качества пилотирования самолета летчиком / Ю. А. Кибардин, В. В. Кашковский, В. В. Устинов, Ю. Н. Шишкин / Патент на изобретение RU 2136046 C1, 27.08.1999. Заявка № 98106546/09 от 30.03.1998.

7. *Устинов В. В.* Алгоритмическое обеспечение поддержки принятия решений инструкторским составом по планированию летной подготовки // Международная научно-техническая конференция, посвященная 40-летию образования МГТУ ГА. М.: МГТУ ГА, 2011. С.34-37.

8. *Устинов В. В.* Один из подходов к планированию подготовки курсантов летных училищ с учетом уровня натренированности и качества выполнения полетного задания / В. В. Устинов, П. С. Назаров // Crede Experto: транспорт, общество, образование, язык. 2020. № 1. С. 74-88.

9. *Форсайт Дж.* Машинные методы математических вычислений / Дж. Форсайт, М. Малькольм, К. Моулер / Пер. с англ. М.: Мир, 1980. 279 с.

References

1. Beshelev S. D.(1980) Mathematical and statistical methods of expert evaluation / S. D. Beshelev, F. G. Gurvich. М.: Statistika, 1980. 263 p. (in Russian)

2. Dobrynin N. A. One of the approaches to the development of a software module for evaluating the quality of piloting using the software and hardware complex "Monster". Actual issues of research in avionics: theory, maintenance, development / N. A. Dobrynin, V. V. Ustinov / / Book of abstracts. All-Russian scientific and practical conference "Aviator", Voronezh, February 12-14, 2014 Voronezh: VUNTS VVS "VVA", 2014. Pp. 185-187. (in Russian)

3. Evlanov L. G.(1982) Expert assessments in management / L. G. Evlanov, V. A. Kutuzov. М.: Ekonomika, 1982. 133 p. (in Russian)

4. Forsythe J. (1980) Machine methods of mathematical calculations / J. Forsyth, M. Malcolm, K. Moulter / Transl. from Engl. М.: Mir, 1980. 279 p. (in Russian)

5. Kashkovsky V. V. Method of objective assessment of professional readiness of the flight crew of maneuverable aircraft / V. V. Kashkovsky, V. V. Ustinov // Scientific Bulletin of the Moscow State Technical University of Civil Aviation. 2013. №. 187. Pp. 161-163. (in Russian)

6. Kibardin Yu. A. Device for evaluating the quality of piloting an aircraft by a pilot / Yu. A. Kibardin, V. V. Kashkovsky, V. V. Ustinov, Yu. N. Shishkin / Patent for invention RU 2136046 C1, 27.08.1999. Application №. 98106546/09 dated 30.03.1998. (in Russian)

7. Ustinov V. V. Algorithmic support for decision-making by instructors for flight training planning // International scientific and technical conference devoted to the 40 anniversary of MSTU CA. M.: MSTU CA, 2011. Pp. 34-37. (in Russian)

8. Ustinov V. V. One approach to the planning of training of cadets of flight schools based on the level of training and quality of flight assignment / V. V. Ustinov, P. S. Nazarov // Crede Experto: transport, society, education, language. 2020. No. 1. Pp. 74-88. (in Russian)

9. Wentzel E. S. (2006) Probability theory: textbook. the manual for high schools. 10th ed. Moscow: Vysshaya shkola, 2006, 575 p. (in Russian)