

Acknowledgements: The study was carried out due to a grant from the Russian Science Foundation (project No. 14-11-00046).

For citation:

Fomichev A. V., Li E. K. Accuracy Analysis of the Analytical Solution for the Lunar Lander Terminal Guidance Problem, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2017, vol. 18, no. 7, pp. 484—492.

DOI: 10.17587/mau.18.484-492

References

1. **Cheng R. K., Pfeffer I.** Terminal Guidance System for Soft Lunar Landing, *Guidance and Control*. Edited by Robert E. Roberson (Progress in Astronautics and Rocketry. vol. 8), Elsevier, 1962, pp. 217—239.
2. **Lihachev V. N., Siharulidze Ju. G., Fedotov V. P.** *Vestnik FGUP NPO n. a. S. A. Lavochkina*, 2012, no. 5, pp. 27—33 (in Russian).
3. **Cheng R. K.** Surveyor Terminal Guidance, *Peaceful Uses of Automation in Outer Space*, Springer US, 1966, pp. 499—514.

4. **Siharulidze Ju. G.** *Ballistika i navedenie letatel'nyh apparatov* (Ballistics and Guidance of Flight Vehicles), Moscow, BINOM. Laboratoriya znaniy, 2011, 407 p. (in Russian).

5. **Razygraev A. P.** *Osnovy upravleniya poljotom kosmicheskikh apparatov* (Fundamentals of spacecraft flight control), Moscow, Mashinostroyeniye, 1990, pp. 378—386 (in Russian).

6. **Lihachev V. N., Siharulidze Ju. G., Fedotov V. P.** i dr. *Vestnik FGUP NPO n. a. S. A. Lavochkina*, 2012, no. 4, pp. 92—102 (in Russian).

7. **Batenko A. P.** *Sistemy terminal'nogo upravleniya* (Terminal Control Systems), Moscow, Radio i svyaz', 1984, 161 p. (in Russian).

8. **Klumpp A. R.** Apollo Lunar Descent Guidance, *Automatica*, 1974, vol. 10, no. 2, pp. 133—146.

9. **Moesser T. G.** Guidance and Navigation Linear Covariance Analysis for Lunar Powered Descent, 2010, All Graduate Theses and Dissertations, p. 654.

10. **Fomichev A. V., Li E. K.** Analytical 3D Terminal Guidance Algorithm for Lunar Landing, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2017, vol. 18, no. 6, pp. 423—431 (in Russian).

УДК 629.7

DOI: 10.17587/mau.18.492-495

Г. П. Шибанов, д-р техн. наук, проф., вед. науч. сотр., gprshibanov@mail.ru,
Государственный летно-испытательный центр им. В. П. Чкалова

Оценка степени обученности оператора для управления летательным аппаратом

Предлагается дисперсионный метод объективной оценки степени обученности оператора для управления сложным транспортным средством на примере маневренного летательного аппарата. Внешнее (входное) воздействие на летательный аппарат со стороны окружающей его в полете среды воспроизводится с необходимой спектральной плотностью путем пропускания через формирующий фильтр второго порядка сигнала от промышленного генератора белого шума.

Ключевые слова: оценка, оператор, качество подготовки, надежность, летательный аппарат, эффективность, тренировка, формирующий фильтр второго порядка

Непрерывное поддержание мастерства операторов путем выполнения систематических тренировок по управлению сложными транспортными средствами типа атомных подводных лодок, космических кораблей, наземных большегрузных транспортных средств специального назначения, высокоманевренных летательных аппаратов — это один из основных факторов, определяющих безопасность функционирования такого типа объектов. Повышенная опасность для жизни экипажей этого типа транспортных средств в начальный период эксплуатации и их высокая стоимость привели к необходимости создания тренажеров, воспроизводящих иллюзию пространственного перемещения подобных средств в соответствующей среде и позволяющих отрабатывать действия операторов при управлении ими.

Важный фактор при обучении операторов на тренажерах — умение контролировать и анализировать процессы управления и сравнивать их между собой. В настоящее время на основе практического опыта обучения операторов сложных транспортных средств разработаны методы и нормативы оценки качества управления указанными средствами [1—3].

Однако при оценке степени тренированности операторов и качества управления транспортными средствами различного назначения большое значение занимают субъективные критерии, входящие в ряд нормативов [3]. Основные причины субъективизма в оценке качества управления такими транспортными средствами операторами — индивидуальные психофизиологические особенности последних и разный уровень профессиональной подготовки инструкторов. Вместе с тем, практически невозможно полностью автоматизировать процесс подготовки операторов и оценивание достигнутого ими качества управления транспортными средствами. Человек-инструктор нужен хотя бы на конечном этапе подготовки операторов. Об этом красноречиво говорит опыт подготовки операторов, входящих в состав экипажей летательных аппаратов (летчиков, штурманов, бортинженеров и других специалистов, реализующих специфические функции операторов в полете). Особенно сложной оказывается подготовка летчиков-истребителей, выступающих в роли операторов высокоманевренных сверх- и гиперзвуковых летательных аппаратов, из-за острого дефицита времени, необходимого им для принятия решений и последующей реализации

управляющих воздействий на органы управления. Остановимся на этом более подробно.

Сложность воспроизведения на тренажере стрессовых условий полета определяется не только тем, что на летательный аппарат в полете действуют возмущающие силы, которые могут быть представлены как стационарный случайный процесс определенного диапазона частот и амплитуд, но и необходимостью учета психофизиологических возможностей человека-оператора [1, 2].

Если случайные стационарные возмущения оценивать средним квадратическим отклонением σ_x [4–6] и, кроме того, проводить измерение средней квадратической ошибки пилотирования (прицеливания, управления бортовыми системами) σ , то предлагаемый дисперсионный метод объективной оценки процесса тренировки и степени обученности операторов летательного аппарата в задачах стабилизации и управления последним сводится к определению отношения σ/σ_x .

Сущность данного метода состоит в том, что если, несмотря на продолжение тренировок, численное значение отношения σ/σ_x не уменьшается (является минимальным $[\sigma/\sigma_x]_{\min}$), то это указывает на тот факт, что оператор достаточно обучен управлению объектом, и ошибка пилотирования остается в среднем неизменной.

Значения $[\sigma/\sigma_x]_{\min}$ у операторов различны и зависят от индивидуальных качеств человека, определяемых его психофизиологическими возможностями. Чем меньше значение $[\sigma/\sigma_x]_{\min}$, тем лучше оператор может стабилизировать летательный аппарат и управлять им.

При обосновании дисперсионного метода объективной оценки процессов тренировок и степени обученности будем исходить из того, что для обучения операторов навыкам управления летательным аппаратом на тренажерах используются следующие основные четыре задачи стабилизации и управления [7–10].

1. Стабилизация изолированного движения крена. Данное движение описывается уравнением

$$\ddot{\gamma} + k_{\dot{\gamma}} \dot{\gamma} = k^i Z_p + \chi_{\gamma},$$

где γ , $\dot{\gamma}$, $\ddot{\gamma}$ — угол крена, первая и вторая его производные; $k_{\dot{\gamma}}$, k^i — коэффициенты передачи; Z_p — перемещение ручки управления в поперечном направлении; χ_{γ} — непрерывное случайное возмущение в поперечном направлении.

2. Стабилизация изолированного движения тангажа. Движение объекта управления в данном случае описывается системой уравнений

$$\ddot{\alpha} + 2\xi\omega_0\dot{\alpha} + \omega_0^2\alpha = K^{\alpha}X_p + \chi_{\alpha} = S_{\alpha}\alpha + \dot{\alpha},$$

где α , $\dot{\alpha}$, $\ddot{\alpha}$ — угол атаки, первая и вторая его производные; ξ — коэффициент демпфирования летательного аппарата; ω_0 — собственная частота лета-

тельного аппарата; K^{α} , S_{α} — коэффициенты передачи; X_p — перемещение ручки управления в продольном направлении; χ_{α} — непрерывное случайное возмущение в продольном направлении.

3. Стабилизация движения крена при наличии тангажа. Движение по крену и тангажу описывается так же, как в предыдущих задачах, однако при этом внешние возмущения в канале тангажа отсутствуют ($\chi_{\alpha} = 0$).

4. Управление летательным аппаратом. Движение летательного аппарата описывается в этом случае уравнениями

$$\ddot{\theta} + 2\xi\omega_0\dot{\theta} + \omega_0^2\theta = K^{\alpha}\alpha + \chi_{\alpha};$$

$$\ddot{\theta} = S_{\alpha}\alpha; \dot{H} = \frac{V}{57,3}\theta,$$

где θ , $\ddot{\theta}$ — угол наклона траектории и его вторая производная; V — скорость полета; $\dot{H}$ — превышение летательного аппарата над заданной точкой.

Передаточная функция оператора при решении задач стабилизации по крену достаточно точно описывается выражением вида [2]

$$W = (\mu_{\dot{\gamma}}p + \mu_{\gamma})e^{-\tau p}, \quad (1)$$

где $\mu_{\dot{\gamma}}$, μ_{γ} — коэффициенты передачи, изменяющиеся по мере роста натренированности оператора; p — оператор Лапласа; τ — время реакции оператора. Опыт работы операторов показывает, что тренировки почти не изменяют полное время реакции, поэтому его можно считать постоянным, равным 0,2 с [2, 11, 12].

Передаточная функция оператора имеет аналогичный вид и при решении задач стабилизации по тангажу, и при управлении летательным аппаратом.

Коэффициенты передачи можно определить из выражений, полученных из условия минимума среднеквадратической ошибки между вычисляемым по передаточной функции оператора (1) и фактическим перемещением ручки управления. Выражения для определения этих коэффициентов в канале крена имеют вид

$$\mu_{\dot{\gamma}} = \frac{\int_0^T Z_p \dot{\gamma}(t-\tau) dt}{\int_0^T \dot{\gamma}^2(t-\tau) dt}; \mu_{\gamma} = \frac{\int_0^T Z_p \gamma(t-\tau) dt}{\int_0^T \gamma^2(t-\tau) dt}.$$

Ошибка аппроксимации действий оператора в канале крена определяется выражением

$$\sigma^2 = \frac{1}{T} \int_0^T [\mu_{\dot{\gamma}} \dot{\gamma}(t-\tau) + \mu_{\gamma} \gamma(t-\tau) - Z_p(t)]^2 dt.$$

Внешнее возмущение X со спектральной плотностью, близкой к той, что характерна для реальных условий полета летательного аппарата, может быть получено путем пропускания сигнала от про-

мышленного генератора белого шума через формирующий фильтр второго порядка вида [5]

$$X = \frac{1}{T^2 p^2 + 2\xi T p + 1}.$$

Практическую проверку предлагаемого дисперсионного метода объективной оценки качества тренировки и степени обученности операторов проводили на специализированном тренажере летчиков применительно к задачам стабилизации и прицеливания. Тренажер был выполнен на тех же принципах и элементной базе, что и серийные тренажеры. В проверке метода принимали участие операторы различной квалификации с различным опытом летной работы.

В процессе практической проверки предлагаемого метода установлено, что:

- у всех операторов ошибка пилотирования через 5...7 дней тренировок уменьшается не менее чем в два-три раза, при этом коэффициенты передаточной функции оператора в соответствующих каналах управления увеличиваются более чем в три-четыре раза;
- излишнее число тренировок при решении задач стабилизации и прицеливания практически не снижает среднеквадратической ошибки пилотирования и не увеличивает коэффициентов передаточной функции оператора;
- для восстановления навыков пилотирования после длительного перерыва даже опытному оператору необходима тренировка. Например, при перерыве в пилотировании в один месяц необходима тренировка продолжительностью не менее одного рабочего дня;
- для характеристики процесса обучения наряду с ошибкой пилотирования целесообразно использовать коэффициенты передаточной функции оператора. Это обусловлено тем, что, несмотря на то что среднеквадратическая ошибка пилотирования почти не меняется, коэффициенты передачи по мере дальнейшего обучения продолжают некоторое время увеличиваться.

В заключение следует заметить, что предложенный метод дает возможность:

- объективно оценить степень тренированности и подготовленности операторов к решению задач

управления летательными аппаратами по значениям относительной среднеквадратической ошибки управления и коэффициентам передаточной функции оператора в различных каналах управления;

- сократить сроки обучения операторов и более эффективно использовать тренажеры за счет повышения точности определения степени подготовки операторов и выявления их индивидуальных качеств в задачах управления летательным аппаратом по различным каналам.

Использование в тренажерах в качестве возмущающих сил стационарного случайного процесса определенного диапазона амплитуд и частот приближает условия тренировки операторов на тренажере к реальным условиям полета и повышает качество тренажей.

Список литературы

1. Шибанов Г. П. Оценка эффективности работы экипажа в условиях стресса // Психологические проблемы космических полетов. М.: Наука, 1979. С. 69—84.
2. Шибанов Г. П. Количественная оценка деятельности человека в системах "человек-техника". М.: Машиностроение, 1983. 263 с.
3. Нафтульев А. И. Некоторые инженерно-психологические проблемы разработки тренажеров // Ученые записки ЛГУ. № 380. Экспериментальная и прикладная психология. 1975. Вып. 6. С. 88—94.
4. Вентцель Е. С. Теория вероятностей. М.: Наука. Физматгиз, 1962. 564 с.
5. Пугачев В. С. Оптимальные обучающие системы // Докл. АН СССР. 1967. Т. 175, № 5. С. 1022—1025.
6. Пугачев В. С. Теория вероятностей и математическая статистика. М.: Наука. Физматгиз, 1979. 496 с.
7. Шибанов Г. П. Оптимизация системы управления летательного аппарата по критериям управляемости и наблюдаемости // Мехатроника, автоматизация, управление. 2012. № 4. С. 57—61.
8. Шибанов Г. П. Оптимизация процесса контроля бортовых комплексов оборудования летательных аппаратов // Мехатроника, автоматизация, управление. 2014. № 6. С. 56—61.
9. Бюшгенс Г. С. Аэродинамика, устойчивость и управляемость сверхзвуковых самолетов. М.: Наука, 1998. 770 с.
10. Математическое моделирование при формировании облика летательного аппарата / В. В. Гуляев, О. Ф. Демченко, Н. И. Долженков и др.; Под ред. В. А. Подобедова. М.: Машиностроение-Полет, 2005. 496 с.
11. Ушаков И. Б., Богомолов А. В., Кукушкин Ю. А. Паттерны функциональных состояний оператора. М.: Наука, 2010. 390 с.
12. Ушаков И. Б., Кукушкин Ю. А., Богомолов А. В. Физиология труда и надежность деятельности человека / Под ред. А. И. Григорьева. М.: Наука, 2008. 317 с.

Evaluation of the Quality of Training of the Aircraft Operators

G. P. Shibarov, gpshibarov@mail.ru✉,

Government Test-flight Center named after V. P. Chkalov, Akhtubinsk, Russian Federation

Corresponding author: Shibarov Georgii P., D. Sc., Professor, Leading Researcher,
Government Test-flight Center named after V. P. Chkalov, Akhtubinsk, Russian Federation,
e-mail: gpshibarov@mail.ru

Received on September 29, 2016

Accepted on October 21, 2016

Safety and efficiency of operation of complex high-cost means of transportation are impossible without thorough training of operators. Major attention in the process of training of the operators is devoted to the trainer-machine and methods of evaluation of the reached results of training. The author proposes a methodology for evaluation of the quality of man-operator training for operation of the complex high-cost means of transportation, aircraft, for example. In the process of realization of operators' training the trainer-machines are used for receiving signals from the filter of the second order. The filter meets the standard of a generator of a white noise. Use of a standard generator of the white noise gives a possibility to obtain valuable conclusions. The experiment of the trainer-machine was an immediate success — the results were surprising. A spectrum of the signals were received, which by the frequency and amplitude, as it was found out, were near the spectrum of the signals typical for the real conditions of a high-mobile flight of an aircraft. Evaluation of the reached results of training on the trainer-machine demonstrated the quality of stabilization and direction-control of an aircraft as far as four rather difficult problems are concerned. Those problems relate to the dynamics of an aircraft. They are described by the systems of a differentiation equation, which is the program maintenance of the trainer-machine. An operator solves the problems of the longitudinal and transversal or diametrical direction of a flight. The mathematical algorithm for stabilization and direction of an aircraft envisages that the machine time of the operator's reaction is equal to 2 s. It is the time accepted for the standard, based on the results of a big number of experiments and thorough research. Evaluation of the reached results of training of a man-operator is based on the established facts and it ensures the minimal value of the ratio of the root-mean-square deviations of the parameters of a turbulent airflow and errors of stabilization and control of a man-operator on pitch and roll of a plane (aircraft).

Keywords: estimation, operator, quality of training, reliability, aircraft, effectiveness, training, form-filter of the second order

For citation:

Shibanov G. P. Evaluation of the Quality of Training of the Aircraft Operators, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2017, vol. 18, no. 7, pp. 492—495.

DOI: 10.17587/mau.18.492-495

References

1. **Shibanov G. P.** Estimation of efficiency work of crew at stress conditions, *Psychological problems of space flight*, Moscow, Nauka, 1979, pp. 69—84 (in Russian).
2. **Shibanov G. P.** Quantitative estimation of man operational in systems "man-machinery", Moscow, Mashinostroenie, 1983, 263 p. (in Russian).
3. **Naftulyev A. I.** Certain engineer-psychology problems of development trainers, *Scientific paper of LGU*, no. 380, *Experimental and applied psychology*, Leningrad, 1975, iss. 6, pp. 88—94 (in Russian).
4. **Ventcel E. S.** Theory of probability, Moscow, Nauka, Fismatgis, 1974, 564 p. (in Russian).
5. **Pugachev V. S.** Optimization training systems, *Paper of AN SSSR*, 1967, vol. 175, no. 5, pp. 1022—1025 (in Russian).
6. **Pugachev V. S.** Theory of probability and mathematical statistics, Moscow, Nauka, Fismatgis, 1979, 496 p. (in Russian).
7. **Shibanov G. P.** Optimization of systems control flying machine for criteria controlled and observable, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2012, no. 4, pp. 57—59 (in Russian).
8. **Shibanov G. P.** Optimization of process test-control of airborne of flying machine, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2014, no. 6, pp. 57—61 (in Russian).
9. **Bujgens G. S.** Aerodynamics, stability and controllability of supersonic airplanes, Moscow, Nauka, 1998, 770 p. (in Russian).
10. **Gulyev V. V., Demchenko O. F., Doldenkov N. I.** et al; Edited by V. A. Podobedov. Mathematic simulation in the time of formation the face flying machine, Moscow, Mashinostroenie-Polet, 2005, 496 p. (in Russian).
11. **Ushakov I. B., Bogomolov A. V., Kukushkin Ju. A.** Patterns of functional state of operator, Moscow, Nauka, 2010, 390 p. (in Russian).
12. **Ushakov I. B., Kukushkin Ju. A., Bogomolov A. V.** Edited by A. I. Grigoriev, Physiology of work and reliability of man activities, Moscow, Nauka, 2008, 317 p. (in Russian).

УДК 629.7.05.67: 629.7.054.44

DOI: 10.17587/mau.18.495-502

В. М. Солдаткин, д-р техн. наук, зав. кафедрой, w-soldatkin@mail.ru,

В. В. Солдаткин, д-р техн. наук, доц., w-soldatkin@mail.ru,

Казанский национальный исследовательский технический университет им. А. Н. Туполева-КАИ,

Д. Л. Крылов, гл. конструктор, kdldim@mail.ru,

АО "Аэроприбор-Восход", Москва

Теоретические основы построения системы воздушных сигналов самолета с неподвижным невыступающим приемником потока

Раскрываются особенности построения, алгоритмы обработки информации, методика и оценка погрешностей измерения высотно-скоростных параметров системы воздушных сигналов самолета с неподвижным невыступающим приемником потока.

Ключевые слова: самолет, воздушные сигналы, измерение, система, неподвижный невыступающий приемник, теоретические основы построения, алгоритмы, оценка точности измерительных каналов

Введение

Полет самолета происходит в пределах атмосферы, и для его выполнения в штурвальный и автоматическом режимах пилотирования и эффективного решения полетных задач необходима достоверная

информация о величине и составляющих вектора истинной воздушной скорости, аэродинамических углах атаки и скольжения, барометрической высоте, приборной скорости, числе Маха, других воздушных сигналах, определяющих аэродинамику и