

УДК 629.7.073

DOI 10.51955/2312-1327_2024_1_67

СЕНСОРНАЯ И ИНТЕРСЕНСОРНАЯ МОДЕЛЬ СИСТЕМЫ ПИЛОТ – ВОЗДУШНОЕ СУДНО

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

*Артем Андреевич Федоров,
orcid.org/0000-0001-6607-2961,
аспирант
Санкт-Петербургский государственный университет
гражданской авиации имени главного маршала авиации А.А. Новикова,
ул. Пилотов, д. 38
Санкт-Петербург, 196210, Россия
melom111@yandex.ru*

*Андрей Валерьевич Федоров,
orcid.org/0000-0001-7911-8631,
кандидат педагогических наук, доцент
Санкт-Петербургский государственный университет
гражданской авиации имени главного маршала авиации А.А. Новикова,
ул. Пилотов, д. 38
Санкт-Петербург, 196210, Россия
fav1309@yandex.ru*

Аннотация. В этой статье представлен обзор компонентов модели пилота, используемой для проектирования системы управления полетом, в которой особое внимание уделяется физиологическим аспектам и аспектам ручного управления. Использована структура многоэлементной системы, раскрывающая совокупность взаимодействия пилота с воздушным судном при реализации ручного управления. Ручное управление является наиболее сложным процессом при выполнении полета воздушного судна, требующего большого опыта и высоких навыков пилота. Рассмотрены сенсорная и интерсенсорная модели системы «пилот – воздушное судно». Применение этих моделей требует знания механизмов и процессов, которые непосредственно участвуют в развитии пространственной ориентации пилота при ручном управлении воздушным судном. Разработка метода и математической модели формирования навыка по ведению пространственной ориентации является актуальной задачей научных исследований.

Ключевые слова: пилот, модель, пространственная дезориентация, воздушное судно, органы чувств, человеческий фактор.

SENSORY AND INTERSENSORY MODEL OF THE PILOT – AIRCRAFT SYSTEM

*Gennady V. Kovalenko,
orcid.org/0000-0002-4849-8878,
Doctor of Technical Science, Professor
St. Petersburg State University of Civil Aviation
named after Air Chief Marshal A.A. Novikov,
38, street of Pilots
Saint-Petersburg, 196210, Russia
kgvf@inbox.ru*

*Artem A. Fedorov,
orcid.org/0000-0001-6607-2961,
postgraduate student
St. Petersburg State University of Civil Aviation
named after Air Chief Marshal A.A. Novikov,
38, street of Pilots
St. Petersburg, 196210, Russia
melom111@yandex.ru*

*Andrey V. Fedorov,
orcid.org/0000-0001-7911-8631,
Candidate of Pedagogical Sciences, Associate Professor
St. Petersburg State University of Civil Aviation
named after Air Chief Marshal A.A. Novikov,
38, street of Pilots
St. Petersburg, 196210, Russia
fav1309@yandex.ru*

Abstract. The paper provides an overview of the components of the pilot model used to design the flight control system which focuses on the physiological aspects and aspects of manual control. The structure of a multi-element system is used which allows the authors to reveal the totality of interaction between the pilot and the aircraft during the implementation of manual control. Manual control is the most difficult process when performing an aircraft flight and requires a lot of experience and high pilot skills. The sensory and intersensory models of the pilot–aircraft system are considered. The application of these models requires knowledge of the mechanisms and processes that are directly involved in the development of the pilot's spatial orientation when controlling the aircraft manually. The development of a method and a mathematical model for the formation of spatial orientation skills is an urgent task of scientific research.

Keywords: pilot, model, spatial disorientation, aircraft, sensory organs, human factor.

Введение

Данная статья является составной частью диссертационного исследования на тему «Метод и математическая модель формирования навыка по ведению пространственной ориентации». Математические представления о поведении человека при управлении воздушным судном сыграли очень важную роль в пилотируемой авиации, особенно в определении требований к управляемости воздушным судном. Проблемы, связанные с достижениями в области аэрокосмических технологий, таких как компьютеризированные системы управления и моделирование полета, привели к появлению все более сложных математических представлений о поведении пилота. Однако все эти области, как

правило, исследуются отдельно и параллельно с исследованиями человеческого фактора.

Цель работы – анализ существующих моделей и методов, обеспечивающих реализацию ручного управления воздушным судном, для разработки совершенной системы «пилот – воздушное судно», обеспечивающей заданный уровень безопасности полетов.

Дискуссия

В процессе составления модели пилота используется широкая область инженерных достижений с вкладом из многих дисциплин, которые рассматривают взаимодействие с людьми, будь то оператор или пользователь [Radar Systems..., 2021]. Инженерные результаты включаются либо явно, либо неявно при проектировании повседневных объектов или сложных устройств. В свое время исследователи фокусировались в основном на качественных описаниях возможных действий человека, но за последние двадцать лет понимание человеческого восприятия и обработки информации значительно продвинулось. Сейчас же используются доступные вычислительные мощности, что помогает исследовать глубокие функции мозга, а также определять и разрабатывать функциональные карты нейронов в мозге, рассмотренные в работах [Brain–Computer..., 2013; Markram, 2012; Seung, 2012].

Материалы и методы

Из всей области моделирования деятельности пилотов в данной статье авторами предложены те методы, в которых рассматриваются вопросы моделирования динамики ручного пилотирования, направленные на обеспечение заданного уровня безопасности полетов [Besogonov et al., 2023].

Данное исследование требует не только понимания ручного пилотирования, но и понимания системы «пилот – воздушное судно» (П-ВС) в целом. Современные гражданские самолеты фактически имеют три режима работы:

1. Управление воздушным судном может осуществляться посредством полного ручного управления с выдерживанием траектории самим пилотом или при помощи директорных указателей системы автоматизированного управления воздушным судном [Attitude..., 2023].

2. Управление может быть осуществлено при помощи панели управления режимами автопилота. Здесь пилот в основном контролирует режимы автопилота, и его вмешательство требуется лишь на определенных этапах выполнения задачи.

3. Компьютер управления полетом может быть запрограммирован на земле. Автопилот самолета будет выдерживать траекторию полета при помощи указателей. В данном случае пилот берёт на себя функции наблюдения и контроля функций автопилота, с дополнительным контролем службы движения [Emergency..., 2023].

На рис. 1 представлены основные компоненты, которые участвуют в ручном управлении, эти компоненты необходимы для отображения динамики

ручного пилотирования. Главным компонентом этой системы является цель, для достижения которой, посредством обработки цели высшими функциями мозга, определяется процесс достижения результата.

Рисунок 1 – Блок-схема, представляющая систему «пилот – воздушное судно» при ручном управлении.

В ситуациях, требующих немедленное выполнение определенных процедур, идет упрощение цели. Здесь управляющие действия уже во многом зависят от опыта и навыков пилота, именно поэтому на данном этапе большую роль играет обучение пилота. Знания, навыки и опыт пилота помогают определить необходимые сигналы и усилия для того, чтобы установить контроль с обратной связью. Нервно-мышечная система осуществляет управляющее воздействие на руль управления. Сигналы от руля управления, в свою очередь, используются в качестве требований к параметрам динамики полета, таким как угол тангажа или нормальное ускорение. Эти требования удовлетворяются при помощи системы управления самолета, которая обеспечивает соответствующее движение управляющих поверхностей или изменение режимов работы двигателя. Таким образом, изменения положения крыла или хвостового оперения, или значения тяги двигателя создают силы и моменты, которые меняют положение самолета относительно встречного воздушного потока. Пилот получает информацию о новом положении самолета в основном посредством визуальной сенсорной системы, которая доставляет информацию о внекабинной обстановке в мозг [Erokhin et al., 2021]. Пилот также воспринимает сигнал руля управления через проприоцептивное чувство. Эти сигналы эффективно замыкают контуры управления с обратной связью. Однако

положение пилота в самолете также означает, что его тело подвержено результирующим ускорениям, возникающим либо из-за его команд, либо из-за атмосферных возмущений. Поэтому на нервно-мышечные силы, действующие на руль управления, влияет возмущение, возникающее, когда ускорения самолета проходят через биодинамическую систему пилота, то есть ключевые компоненты модели пилота могут быть сгруппированы как теоретические и сенсорные модели управления.

Существующие модели формирования навыка ручного управления воздушным судном. Сенсорная модель

Наши органы чувств эволюционировали и теперь представляют собой сложный сенсорный комплекс, который, в сочетании с центральной нервной системой (ЦНС), можно определить как сложный пример сбора и объединения данных. Однако эта система лучше всего подходит для умеренных угловых вращений короткой продолжительности, ежедневно испытываемых на земле. Несмотря на то, что мы считаем наше восприятие окружения безошибочным, частые вращения низкой интенсивности и большой продолжительности, испытываемые в полете, могут легко привести к ошибочному восприятию, ведущему к дезориентации.

Ситуация, когда пилот не может правильно воспринимать положение, движение или отношение самолета в рамках фиксированной системы координат, обеспечиваемой поверхностью Земли и ее гравитационным полем, определяется как пространственная дезориентация (ПД).

Сенсорная модель человека должна, по крайней мере, быть способна имитировать некоторые виды дезориентации пилота.

Исследования в области ПД были начаты Эрнстом Махом, чья работа в области сверхзвука фактически уходила корнями в более ранние исследования человеческого вестибулярного аппарата и восприятия звука. Спустя время, в 1877 году, он опубликовал свою работу о сверхзвуковом движении снаряда. Исследования в контексте авиации начались позже, в конце Первой мировой войны, а настоящий прогресс был достигнут только в 1990-х годах. В настоящее время ПД подразделяется на три категории [Tsang et al., 2002]:

- тип I: когда пилот не знает, что воспринимаемая ориентация неверна;
- тип II: когда происходит осознанное признание конфликта между чувствами и приборами;
- тип III: когда пилот испытывает чувство беспомощности и неспособности сохранять контроль из-за непреодолимой путаницы в ориентации.

Во время ситуаций, относящихся к типу I и II, пилот часто отказывается верить приборам, или неправильно интерпретирует сигналы внекабинной обстановки, что, в свою очередь, является причиной большинства катастроф, связанных с пространственной дезориентацией [Tsang et al., 2002].

Для того, чтобы составить математическую модель пространственной дезориентации, требуются знания механизмов и процессов, которые

непосредственно участвуют в развитии пространственной ориентации. На сознательном уровне слуховые и визуальные сигналы используются для получения информации о состоянии воздушного судна в любой момент времени. Подсознательно визуальные, вестибулярные и проприоцептивные сигналы обрабатываются для получения данных о положении, угловом и линейном ускорении. Затем центральная нервная система отвечает за интерпретацию и сравнение с внутренней моделью. Эти модели формулируются на основе прошлого опыта и подготовки, которые, в свою очередь, формируют ожидания относительно динамики самолета [Previc et al., 2004].

Интерсенсорная модель

Современное научное понимание человеческого познания в контексте мультисенсорных стимулов все еще находится на ранних стадиях развития. Большинство подходов к моделированию пилота сосредоточены либо на результирующей динамике полета системы П-ВС, либо изучают динамику пилотирования только через мониторинг входных сигналов рулей управления. Мультисенсорное восприятие моделируется либо просто линейным суммированием сигналов [Hosman et al., 1999; McRuer et al., 1974], либо взвешенной суммой с кажущимся произвольным выбором весовых коэффициентов (значений) (как в случае, предложенном Хессом [Hess, 1980; Hess, 1990]). В большинстве случаев динамика полета под воздействием ПД либо оставлена для качественных исследований человеческого фактора, либо для испытаний на летных тренажерах. Модель, предложенная Тельбаном и Кардулло [Telban et al., 2001], позволяет включить эффекты ПД в более широкую систему моделирования пилота, показанную на рис. 1. Более сложная модель представляет собой нелинейную комбинацию зрительных и вестибулярных органов чувств, которая способна улавливать такие ПД, как иллюзия движения тела пилота. Она позволяет исследовать взаимодействие между зрительными и вестибулярными сигналами, при этом сенсорная модель остается отделенной от теоретического компонента управления. Она также использует подход Хосмана для моделирования динамики зрительного аппарата, отолита и полукружного канала и поэтому остается относительно простой.

Модель вращательного восприятия предоставляет средства для вычисления единой воспринимаемой угловой скорости с учетом фактической угловой скорости, поступающей на зрительные и вестибулярные органы чувств, где последние представлены динамикой полукружного канала. Аналогично, модель поступательного восприятия предоставляет средства для получения воспринимаемой скорости с учетом фактической удельной силы (вектор силы тяжести на единицу массы) и ускорения. Вестибулярная модель будет представлена здесь отолитовыми органами, которые реагируют на конкретную силу, в то время как зрительная модель обрабатывает информацию о скорости.

Пользователь может определить переменные, которые занимают периферийное или фокусное зрение пилота с помощью переключателя. Это позволяет моделировать ситуации, включающие много-осевые задачи, когда пилот наблюдает за угловой скоростью крена при помощи периферийного

зрения одновременно с угловой скоростью тангажа при помощи центрального зрения.

Результаты исследований

В работах приводятся результаты психофизических экспериментов [Hosman et al., 1999; Telban et al., 2000], в которых было установлено, что визуальное восприятие собственного движения вызывает искусственный вестибулярный ответ, и в ограниченной степени верно и обратное. Главной особенностью модели Тельбана и Кардулло является ее способность улавливать такие оценки самодвижения под влиянием зрения и, таким образом, моделировать ПД. Компоненты оптокинетического влияния представляют собой нелинейный коэффициент усиления и фильтр низких частот первого порядка с постоянной времени 1,59 с. Коэффициент усиления эффективно отражает значения, которые обозначают вестибулярное и зрительное восприятие. Он рассчитывается с помощью модифицированной функции Ханна, которая связана с разницей между зрительными и вестибулярными показателями. Затем фильтр моделирует постепенное нарастание воспринимаемого собственного движения. Общее воспринимаемое движение представляет собой сумму вестибулярной оценки и результата оптокинетического воздействия. Второй особенностью является использование внутренних моделей полукружных каналов и отолитов, что неявно предполагает, что ЦНС сравнивает визуальные стимулы с оценкой вестибулярного ответа.

Вестибулярная модель Фернандеса [Fernández et al., 1971] и модель отолита, предложенная Талибаном [Telban et al., 2000], практически идентичны модели, разработанной Хосманом [Hosman et al., 1999]. Отолитовые органы реагируют на специфическую (удельную) силу (f), определяемую следующим образом:

$$f = \hat{g} - a_h, \quad (1)$$

где $\hat{g}$ – вектор локальной гравитационной силы, а a_h – ускорение головы относительно системы отсчета, зафиксированной на теле. Для простоты можно предположить, что голова пилота остается на одном уровне относительно продольной оси самолета (на одной оси с корпусом самолета). Передаточная (трансферная) функция, связывающая измеренную удельную силу ($\hat{f}$) с фактической удельной силой, выглядит следующим образом:

$$\frac{\hat{f}(c)}{f(c)} = \frac{0,4(13,2c + 1)}{(5,33c + 1)(0,66c + 1)}, \quad (2)$$

Было показано, что следующая передаточная функция адекватно связывает воспринимаемую угловую скорость вращения ($\hat{\omega}$) с фактической скоростью вращения (ω) [Fernández et al., 1971]:

$$\frac{\hat{\omega}}{\omega} = \frac{456c^2}{(5,7c+1)(80c+1)} \quad (3)$$

И, таким образом, обеспечивает адекватное представление динамики вестибулярного канала.

Оператор адаптации определяет продолжительность, в течение которой допускается конфликт между зрительными и вестибулярными сигналами. Он связывает погрешность между сигналами взаимодействия с погрешностью размытия через следующую передаточную функцию:

$$\frac{e_w(c)}{|e(c)|} = \frac{\tau_w c}{\tau_w c + 1} \quad (4)$$

Было установлено, что постоянная времени τ_w для оператора адаптации составляет восемь и одну секунду для вращательного и поступательного восприятия соответственно.

Динамический отклик двух моделей восприятия показан на рис. 2 и 3. Эти результаты моделирования демонстрируют способность модели отражать тот факт, что, в то время как вестибулярные чувства имеют временные (переходные) характеристики, индуцированное (искусственные) движение через зрительный канал по-прежнему доминирует в восприятии движения человеком.

На рис. 2 представлен более интересный сценарий моделирования поступательного восприятия. Здесь импульс подается только на вестибулярное чувство, в то время как зрительный канал остается «слепым». В результате воспринимаемое движение состоит из начального переходного пика и постоянной скорости, равной нулю. Переходный момент обусловлен вестибулярным сигналом, но он быстро сводится на нет оптокинетическим влиянием. Большая ошибка приводит к большему изменению усиления оптокинетического влияния, что приводит к эффекту отмены.

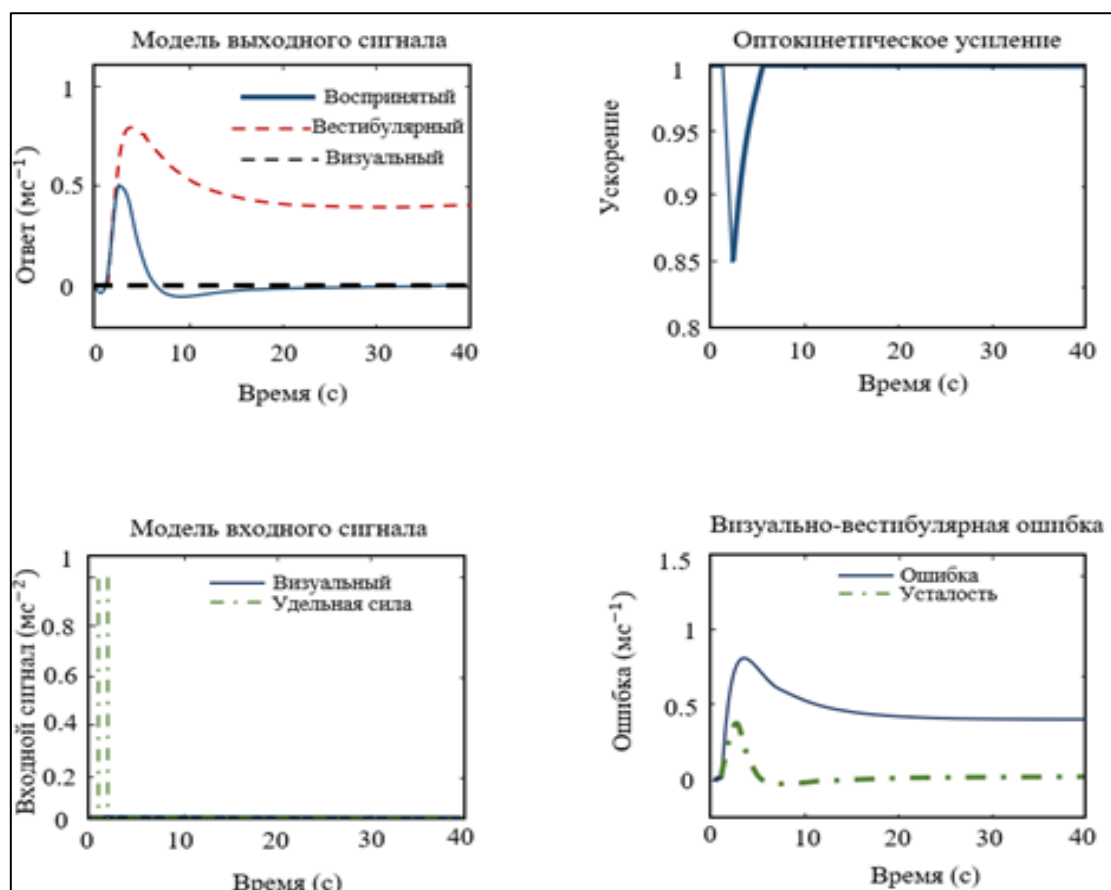


Рисунок 2 – Реакция трансляционной модели только на вестибулярный ввод импульса длительностью 1 мс^{-2} . *Источник:* <https://journals.physiology.org/doi/pdf/10.1152/jn.1971.34.4.661>

На рис. 3 представлена реакция модели восприятия вращения на визуальный и вестибулярный ступенчатый сигнал $1^\circ/\text{с}$. Реакция показывает резкий и точный зрительный ответ, и затухающий вестибулярный ответ. Поскольку оба органа чувств получают одинаковую информацию, угловая скорость в стабильном состоянии улавливается точно.

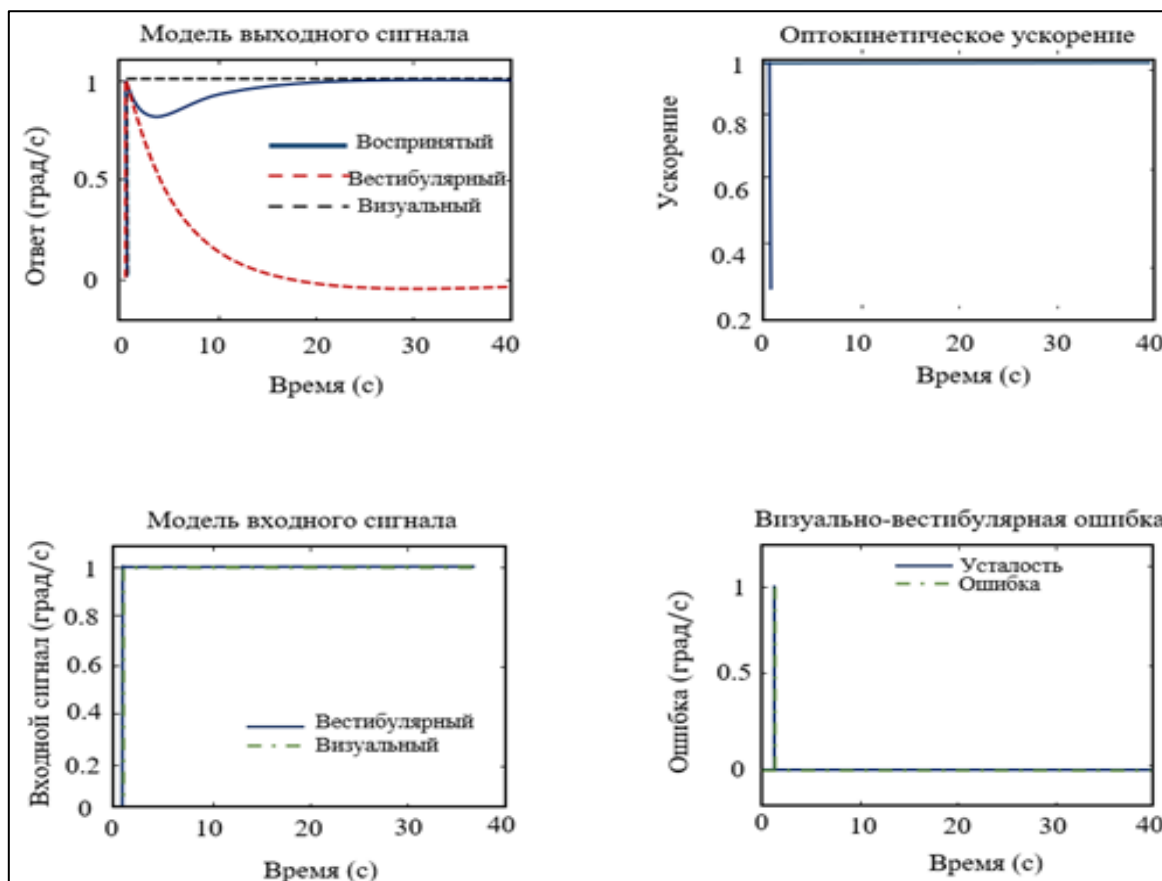


Рисунок 3 – Реакция вращательной модели на вестибулярный и визуальный шаг. *Источник:*
<https://journals.physiology.org/doi/pdf/10.1152/jn.1971.34.4.661>

Заключение

В статье проведен анализ системы пилот – воздушное судно. Выделены основные компоненты модели пилота, которые были сгруппированы как сенсорные и теоретические модели управления. Более подробно рассмотрены сенсорная и интерсенсорные модели. Обоснованно применение интерсенсорной модели при исследовании пространственной дезориентации и построении математической модели пилота. В дальнейшем планируется провести эксперимент для обоснования влияния разрабатываемой математической модели на качество подготовки летного состава.

Библиографический список

- Attitude Indicators in Bank Angle Determination: A Study of Errors. / O. Arinicheva, N. Lebedeva, A. Malishevskii, R. Arefyev // In: O. A. Gorbachev, X. Gao, B. Li (eds) Proceedings of 10th International Conference on Recent Advances in Civil Aviation. Lecture Notes in Mechanical Engineering. Singapore: Springer, 2023. DOI 10.1007/978-981-19-3788-0_24.
- Besogonov V. Development of a Multifactorial Flight Safety Level Assessment Methodology in the Russian Federation Civil Aviation / V. Besogonov, A. Kostylev, M. Ushakov // In: O. A. Gorbachev, X. Gao, B. Li (eds) Proceedings of 10th International Conference on Recent Advances in Civil Aviation. Lecture Notes in Mechanical Engineering. Singapore: Springer, 2023. DOI 10.1007/978-981-19-3788-0_32.

Brain-Computer Interfaces / B. He, S. Gao, H. Yuan, J. R. Wolpaw // In: He, B. (eds) Neural Engineering. Boston, MA: Springer, 2013. DOI 10.1007/978-1-4614-5227-0_2.

Emergency Performance Assessment in Air Traffic Control / A. Malishevskii, I. Krivoborsky, A. Khumorov, S. Vorobyov // In: O. A. Gorbachev, X. Gao, B. Li (eds) Proceedings of 10th International Conference on Recent Advances in Civil Aviation. Lecture Notes in Mechanical Engineering. Springer, Singapore. 2023. DOI 10.1007/978-981-19-3788-0_29.

Erokhin V. Bi-criteria Aircraft Trajectory Optimization in Implementing the Area Navigation Concept // V. Erokhin, B. Lezhankin, T. Portnova // Int. J. Aeronaut. Space Sci. 2021. № 22. pp. 948–962. – DOI 10.1007/s42405-021-00353-3.

Fernández C. Physiology of peripheral neurons innervating semicircular canals of the squirrel monkey. II. Response to sinusoidal stimulation and dynamics of peripheral vestibular system / C. Fernández, J. M. Goldberg // Journal of neurophysiology. 1971. №34(4). 661-75.

Hess R. A. Model for human use of motion cues in vehicular control // Journal of Guidance, Control, and Dynamics. 1990. № 13(3). pp. 476-482.

Hess R. A. Structural Model of the Adaptive Human Pilot // Journal of Guidance Control and Dynamics.. 1980. Vol. 3. pp. 416-423.

Hosman R. (1999). Pilot's perception in the control of aircraft motions / R. Hosman, H. Stassen // Control engineering practice. 1999. Vol. 7(11). pp. 1421–1428. DOI 10.1016/s0967-0661(99)00111-2.

Markram H. The human brain project // Scientific American. 2012. Vol. 306(6). pp. 50–55. DOI 10.1038/scientificamerican0612-50.

McRuer D. T. Mathematical Models of Human Pilot Behavior / D. T. McRuer, E. S. Krendel. London: AGARDograph AGARD-AG-188, Advisory Group for Aerospace Research & Development. 1974. 80 p.

Previc F. H. Spatial Disorientation in Aviation / F. H. Previc, W. R. Ercoline. Reston, Virginia: American Institute of Aeronautics and Astronautics Inc. 2004. 576 p.

Radar Systems of Air Transport. In: Theoretical Foundations of Radar Location and Radio Navigation / D. A. Akmaykin, E. A. Bolelov, A. I. Kozlov, B. V. Lezhankin, A. E. Svistunov, Y. G. Shatrakov // Springer Aerospace Technology. Singapore: Springer, 2021. DOI 10.1007/978-981-33-6514-8_11.

Seung S. Connectome: How the Brain's Wiring Makes Us Who We Are. Boston, New York: Houghton Mifflin Harcourt, 2012. 384 p.

Telban R. An integrated model of human motion perception with visual-vestibular interaction / R. Telban F. Cardullo // in: AIAA Modeling and Simulation Technologies Conference and Exhibit. 2001. DOI 10.2514/6.2001-4249.

Telban R. Investigation of mathematical models of otolith organs for human centered motion cueing algorithms / R. Telban, F. Cardullo L. Guo // in: AIAA Modeling and Simulation Technologies Conference and Exhibit. 2000. DOI 10.2514/6.2000-4291.

Tsang P. S. Principles and Practice of Aviation Psychology / P. S. Tsang & M. A. Vidulich. CRC Press, 2002. 624 p. DOI 10.1201/b12466.