

Применение окулографии для объективной оценки воспроизведения акселерационных эффектов тренажёрными устройствами имитации полёта

П. Ю. Сухочев¹ Я. Ю. Миняйло²

В работе рассмотрены существующие методы оценки качества имитации системой подвижности авиатренажёров акселерационных воздействий, возникающих в полёте. Предложена технология, основанная на модели вестибуло-окулярного рефлекса, позволяющая при помощи современных технических средств производить объективное сравнение вестибулярного отклика на акселерационные воздействия, возникающие в реальном полёте, с их имитацией на комплексных авиационных тренажёрах. Предложено применение указанной технологии для валидации и совершенствования имитационных систем, применяемых для подготовки пилотов к выводу из сложного пространственного положения.

Ключевые слова: вестибуло-окулярный рефлекс, объективная оценка качества тренажёрных устройств имитации полёта, безопасность полётов.

По статистике, опубликованной в отчёте IATA (англ. International Air Transport Association, Международная ассоциация воздушного транспорта) за 2008-2017 годы [10], более 80% человек погибло в катастрофах, классифицированных как CFIT (англ. Controlled Flight Into Terrain, Столкновение в управляемом полёте с поверхностью Земли или объектами, расположенными на её поверхности) и LOC-I (англ. Lost of Control / In-flight — потеря управления в полёте). Согласно терминологии, изложенной в справочнике по категориям авиационных событий [4], к авиационным происшествиям обоих типов приводят в основном ошибочные действия экипажа. Причём, на долю CFIT в период с 1990 года приходится более 20% всех авиакатастроф, а в 1994, 1995 и 2014 году - более

¹ *Сухочев Павел Юрьевич* — научный сотрудник лаб. математического обеспечения имитационных динамических систем мех.-мат. ф-та МГУ имени М.В.Ломоносова, e-mail: ps@moids.ru.

Sukhochev Pavel Yurievich — researcher, Lomonosov Moscow State University, Faculty of Mechanics and Mathematics, Laboratory of Simulation Dynamical Systems Software.

² *Миняйло Яна Юрьевна* — аспирант факультета космических исследований МГУ имени М.В.Ломоносова, e-mail: minyailo_yana@mail.ru.

Minyailo Yana Yurievna — graduate student, Lomonosov Moscow State University, Faculty of Space Research.

50% [11]. Анализ записей переговоров и действий экипажей показал, что к ошибкам приводит в основном неверное понимание пилотом положения летательного аппарата в пространстве в условиях сложной визуальной обстановки. При этом, пилот без сомнений однозначно воспринимает привычные сигналы своего вестибулярного аппарата других механорецепторов, не редко игнорируя (катастрофа Piper PA-32R-301 N9253N близ Мартас-Виньярда, 16.07.1999) или не имея возможности распознать (катастрофа F-15A 75-0040 в Арч Кейп, 26.06.2007) под действием вибраций и перегрузок верные показания приборов. Также механические стимулы, соответствующие ожидаемой реакции летательного аппарата в ответ на воздействие на органы управления, подкрепляют ошибочное представление пилота о положении летательного аппарата в пространстве. С момента поступления первых комплексных тренажёрных устройств в авиационные учебные заведения, оценка адекватности имитации полёта производилась тест-пилотами по шкале Купера-Харпера. Настройка системы подвижности до недавнего времени производилась так же. Только в 2009 году в третьем издании руководящего документа по квалификационной оценке тренажёрных устройств имитации полёта [6] появился объективный метод оценки систем подвижности (англ. OMST, Objective Motion Cueing Tests, Объективное испытание системы подвижности). Общий принцип работы этой системы заключается в подаче на вход системы подвижности набора сигналов разной частоты и оценке сдвига фазы и затухания амплитуды её исполнительных механизмов. Эта система позволяет объективно оценить технический уровень системы подвижности, но до сих пор не реализованы объективные методики оценки качества имитации акселерационных воздействий на органы восприятия пилота и корректности самих алгоритмов имитации. Алгоритмы формирования акселерационных воздействий при помощи системы подвижности современного комплексного устройства имитации полёта разделяют движение при помощи частотного фильтра на две части [8] с границей, находящейся в интервале между быстрым (до 1 рад/с для вращательного и до 0,5 рад/с для поступательного движений) и медленным (более 4 рад/с для вращательного и более 2 рад/с для поступательного движений). Быстрое движение оказывает наибольшее влияние на выполнение задачи по сенсомоторному управлению летательным аппаратом [9] и воспроизводится максимально точно в пределах механических ограничений системы подвижности, с целью обучения пилота по стабилизации ЛА при воздействии внешних возмущений. Медленные движения имитируются менее точно – так как на земле невозможно воспроизвести траекторию движения воздушного судна. При этом, по заявлению пилотов, сравнивающих ощущения в полёте с ощущениями на пилотажном стенде, обычные условия полёта в целом похожи, но при возник-

новении нештатных ситуаций (переход системы управления из Normal mode в Direct mode) и ухудшении условий пилотирования (сложные метеоусловия, сложное пространственное положение), отработанных в процессе обучения на тренажёрных устройствах имитации полёта, замечены многочисленные отличия в ощущениях, а навыки, полученные на этих устройствах, оказываются ложными. Так произошло 5 мая 2019 года с самолётом Sukhoi Superjet 100-95B [5]. При изучении методик сертификации тренажёрного устройства SSJ100 производства L3 Commercial Training Solutions, не было найдено иных объективных систем оценок качества имитации акселерационного воздействия кроме тестов системы подвижности на соответствие амплитудно-частотных характеристик систем техническим требованиям, указанным в руководящем документе о методах квалификационной оценки тренажёрных устройств имитации полёта [6]. В качестве нового подхода к объективной оценке качества имитации акселерационного воздействия предлагается произвести сравнение глазодвигательных реакций пилота при выполнении полёта по одинаковым траекториям на реальном самолёте и на тренажёрном устройстве. В ответ на стимуляцию вестибулярного аппарата у человека возникает вестибуло-окулярный нистагм - серия произвольных ритмичных содружественных движений глаз. Различают две фазы нистагма: медленное отклонение глаза в одном направлении (медленная фаза) и сменяющий его быстрый возвратный скачок (быстрая фаза). Амплитуда и время обеих фаз зависят от величин и направлений угловых и линейных ускорений головы. В работе [1] описана статистическая модель вестибулярного нистагма, вырабатывающая её модельные траектории и имеющие статистические характеристики, соответствующие наблюдаемому в эксперименте. Математическая модель представляет собой зависимости относительного угла поворота глаза и амплитуды медленной и быстрой фаз нистагма от поворота головы. Предлагается оценивать качество имитации полёта, сравнивая параметры нистагма, возникающего в реальном полёте и параметры нистагма во время имитации того же полёта на тренажёрном устройстве. Для отслеживания нистагма во время полёта предлагается использовать метод видеоокулографии, так как это неинвазивный, простой и безопасный метод отслеживания движения глаз. Видеоокулография на тренажёрных устройствах применяется для оценки работы экипажа [2]. При сравнении данных, полученных при помощи окулографа Otometrics ICS Impulse USB при проведении экспериментов на имитационных стендах, оборудованных системой подвижности [3] и в полётах по программе экспериментов в рамках НЦМУ "Сверхзвук" [7] обнаружена идентичность саккад при выполнении наклона до 27° по углу крена с угловым ускорением до $0,084 \text{ рад/с}^2$ для перехода от горизонтального полёта к координированному развороту (инди-

катор скольжения находится в нейтральном положении), но изменение характера саккад при выполнении самого разворота в реальном полёте и практически полное их отсутствие при имитации этого разворота на стенде. Так как сбор данных об акселерационном воздействии на экипаж при моделировании сложных и аварийных ситуаций на пассажирском авиалайнере связан с высоким риском повреждения воздушного судна, для обеспечения безопасности сбор данных производится на борту пилотажных самолётов с максимально точным воспроизведением траектории движения маломаневренного самолёта при сохранении значительного запаса по параметрам управляемости и высоты для вывода. Проведённое исследование показывает возможность создания системы объективной оценки средств имитации, основываясь на модели глаздвигательного отклика на стимуляцию вестибулярного аппарата и применении современных технических средств его измерения.

Список литературы

- [1] Боков Т.Ю., Сучалкина А.Ф., Якушева Е.В., Якушев А.Г., "Математическое моделирование вестибулярного нистагма. Часть I. Статистическая модель", *Российский журнал биомеханики* (2014), **18**:1, 48–64
- [2] Куравский Л.С., Юрьев Г.А., Златомрежев В.И., Грешников И.И., Поляков Б.Ю., "Оценка действий экипажа самолёта по данным видеоокулографии", *Экспериментальная психология* (2021) **14**:1, 204–222.
- [3] Садовничий В.А., Александров В.В., Александрова О.В., Вега Р., Коноваленко И.С., Сото Э., Тихонова К.В., Гордильо-Домингез Х.Л., Гонзалес О., "О гальванической коррекции вестибулярной активности пилота при визуальном управлении полетом", *Вестник Московского университета. Серия 1. Математика. Механика.* (2019) **1**:1, 34–41.
- [4] "Категории Авиационных Событий. Определения и порядок использования при формировании архива материалов расследования авиационных инцидентов и производственных происшествий с гражданскими воздушными судами Российской Федерации", *Федеральное агентство воздушного транспорта. Управление инспекции по безопасности полетов* (2016)
- [5] "Предварительный отчёт МАК", URL: https://mak-iac.org/upload/iblock/4e4/report_ra-89098_pr.pdf (дата обращения: 23.01.2022).
- [6] "Руководство по критериям квалификационной оценки тренажерных устройств имитации полета. Том I. Самолеты", *Международная организация гражданской авиации* (2015)
- [7] Prud V., Mukhamedov A., Sleptsov E., Andrianova O., Chertopolokhov V., Chairez I., "Non-Parametric Spiking Neural Network Modelling of the Eye-Movement Response to Enforced Controlled Accelerations", *IFAC-PapersOnLine* (2021), **54**:13, 311–316
- [8] White A., Rodchenko V., "Motion fidelity criteria based on human perception and performance", *American Institute of Aeronautics and Astronautics* 99–4330, (1999)

- [9] Zaichik L.E., Yashin Yu.P., Desyatnik P.A., "Peculiarities of motion cueing for precision control tasks and maneuvers", *27 International Congress of the Aeronautical Science* (2000).
- [10] "IATA Controlled Flight Into Terrain Accident Analysis Report 2018 Edition", *International Air Transport Association* (2018) ISBN is 978-92-9229-717-6
- [11] "The Aviation Safety Network. Loss of situational awareness", URL: <https://aviation-safety.net/database/events/dblist.php?Event=FCV?> (дата обращения 11.11.2021).

The application of the oculography for the flight simulation training devices acceleration effects objective evaluation
P. Yu. Sukhochev, Ya. Yu. Minyailo

The existing methods for evaluation the quality of the acceleration effects imitated by the motion cueing system of flight simulation training devices are considered. The technology based on the model of the vestibulo-ocular reflex is proposed. It may allow to apply the modern technical equipment to reach the objective comparison of the vestibular response to acceleration effects in a real flight and the simulation. This technology could enhance the simulation systems and it's validation for improve the upset prevention and recovery training.

Keywords: vestibulo-ocular reflex, flight simulators objective quality evaluation, flight safety.

References

- [1] Bokov T.Yu., Suchalkina A.F., Yakusheva E.V., Yakushev A.G., "Mathematical modeling of vestibular nystagmus. Part I. Statistical model" , *Russian Journal of Biomechanics* (2014), **18**:1, 48–64
- [2] Kuravsky L.S., Yuriev G.A., Zlatomrezhev V.I., Greshnikov I.I., Polyakov B.Yu., "Assessing the aircraft crew activity basing on video oculography data", *Experimental psychology* (2021) **14**:1, 204–222.
- [3] Sadovnichii V.A., Aleksandrov V.V., O. V. Aleksandrova, R. Vega, I. S. Konovalenko, Soto E., Tikhonova K.V., Gordillo-Dominguez J.L., and Gonzalez Petlascalco O., "Galvanic correction of pilot's vestibular activity during visual flight control", *Bulletin of the Moscow University. Series 1. Mathematics. Mechanics.* (2019) **1**:1, 34–41.
- [4] "Categories of Aviation Events. Definitions and procedure for use in the formation of an archive of materials from the investigation of aviation incidents and industrial accidents with civil aircraft of the Russian Federation", *Federal Air Transport Agency. Safety Inspection Office* (2016)
- [5] "IAC preliminary report", URL: https://mak-iac.org/upload/iblock/4e4/report_ra-89098_pr.pdf (date of application: 23.01.2022).
- [6] "Manual of Criteria for the Qualification of Flight Simulation Training Devices. Volume I. Aeroplanes", *International Civil Aviation Organization* (2015)

- [7] Prud V., Mukhamedov A., Sleptsov E., Andrianova O., Chertopolokhov V., Chairez I., "Non-Parametric Spiking Neural Network Modelling of the Eye-Movement Response to Enforced Controlled Accelerations", *IFAC-PapersOnLine* (2021), **54**:13, 311–316
- [8] White A., Rodchenko V., "Motion fidelity criteria based on human perception and performance", *American Institute of Aeronautics and Astronautics* 99–4330, (1999)
- [9] Zaichik L.E., Yashin Yu.P., Desyatnik P.A., "Peculiarities of motion cueing for precision control tasks and maneuvers", *27 International Congress of the Aeronautical Science* (2000).
- [10] "IATA Controlled Flight Into Terrain Accident Analysis Report 2018 Edition", *International Air Transport Association* (2018) ISBN is 978-92-9229-717-6
- [11] "The Aviation Safety Network. Loss of situational awareness", URL: <https://aviation-safety.net/database/events/dblist.php?Event=FCV?> (date of application 11.11.2021).