

УДК 629.733.33.015.017.2

В. А. СМИРНОВ,*кандидат технических наук, старший научный сотрудник**(Центральный научно-исследовательский институт вооружения и военной техники Вооруженных Сил Украины, г. Киев),***В. Е. НЕРУБАЦКИЙ,** *кандидат технических наук, старший научный сотрудник**(Харьковский национальный университет Воздушных Сил им. И. Кожедуба, г. Харьков)*

Методические аспекты проведения исследований по нормированию пилотажных характеристик самолетов: применение шкалы пилотажных оценок

Статья посвящена одному из обязательных инструментов исследователя пилотажных свойств самолета – шкале пилотажных оценок самолета. В ней на основе критического анализа существующих зарубежных и отечественных шкал пилотажных оценок самолетов, опыта проведения исследований с их применением в натурных экспериментах предложена пятибалльная шкала качественной оценки пилотажных характеристик самолетов, которая может быть использована при исследованиях по оценке влияния параметров динамики самолета на качество его пилотирования летчиком и их нормирования.

Стаття присвячена одному з обов'язкових інструментів дослідника пілотажних властивостей літака – шкалі пілотажних оцінок літака. У ній на основі критичного аналізу існуючих зарубіжних і вітчизняних шкал пілотажних оцінок літаків, досвіду проведення досліджень з їхнім застосуванням у натурних експериментах запропонована п'ятибальна шкала якісної оцінки пілотажних характеристик літаків, яка може бути використана при дослідженнях з оцінки впливу параметрів динаміки літака на якість його пілотування льотчиком і їх нормування.

Обоснование системы показателей оценки качества пилотажных характеристик самолетов (характеристик устойчивости и управляемости), методов их расчета и экспериментального определения в летных испытаниях, формирование на их основе требований к этим характеристикам всегда являлись (и являются поныне) одними из важнейших задач авиационной науки и имели целью предотвращение аварий летательных аппаратов из-за поломок (разрушений) элементов их конструкции или выхода (попадания) на критические (неэксплуатационные) режимы полета.

Развитие авиационной техники обуславливает необходимость совершенствования системы показателей и методов оценки ее пилотажных качеств, нормирования количественных значений этих показателей.

Основной задачей нормирования (формирования требований) характеристик устойчивости и управляемости является приспособление свойств самолета к возможностям летчика (экипажа) осуществлять управление самолетом на всех этапах полета. Характеристики самолета должны быть такими, чтобы летчик (экипаж) мог эффективно выполнить целевую задачу, поставленную перед ним. Для эффективного решения задач целевого назначения самолета и обеспечения безопасности полета характеристики устойчивости и управляемости должны находиться в строго ограниченных пределах изменения.

К настоящему времени система качественных и количественных показателей оценки пилотажных характеристик самолетов достаточно подробно разработана и изложена в нормативных документах в области как гражданской, так и военной авиации.

Основным документом, регламентирующим качественные и количественные значения показателей оценки качества пилотажных характеристик гражданских самолетов у нас в стране являются авиационные правила АП-25 (аналогичный документ есть и для военных самолетов). Однако следует отметить, что требования к авиационной технике в этих документах сформулированы применительно к неавтоматизированным или слабоавтоматизированным самолетам.

Характерным для нынешнего поколения авиации является широкое внедрение автоматических устройств в контур ручного управления самолета – систем улучшения устойчивости и управляемости (СУУ) – для обеспечения приемлемых характеристик устойчивости и управляемости, совершенствования его маневренных качеств.

Автоматика меняет динамическую структуру системы «СУУ – самолет». Наличие СУУ ведет к повышению порядка уравнений, описывающих систему «СУУ – самолет», и, как следствие, к росту количества нормируемых параметров по сравнению с неавтоматизированным самолетом. Учитывая трудность прогнозирования уровня автоматизации контура ручного управления перспективных самолетов, не представляется возможным выявить все требуемые для нормирования параметры системы «СУУ – самолет» и предъявить к ним требования.

Опыт применения систем улучшения устойчивости и управляемости показал, что оценка пилотажных характеристик самолетов с высокоавтоматизированным контуром ручного управления с помощью показателей, сформулированных в терминах характеристик самолетов, малоэффективна, а иногда и неприемлема [1]. Это вызвано тем, что традиционные методы нормирования характеристик устойчивости и управляемости основаны на экспериментальном определении зависимости между параметрами, характеризующими самолет как объект управления без СУУ, называемыми показателями устойчивости и управляемости, и качественной оценкой летчика пилотажных свойств самолета, выставленной по шкале пилотажных оценок. Субъективная оценка летчиком самолета дает обобщенную характеристику устойчивости, управляемости, удобства работы рычагами (органами) управления, безопасности полета при выполнении маневров, степени психофизической нагрузки летчика при выполнении задач целевого назначения.

Введение автоматизации в контур ручного управления повышает порядок дифференциальных уравнений, описывающих динамику системы «СУУ – самолет», и, как следствие, нарушает установленные ранее для самолетов без СУУ связи между показателями устойчивости и управляемости и качественной оценкой летчика. Кроме того, ряд показателей, установленных для самолетов без автоматизации, формально не имеет смысла для систем «СУУ – самолет» более высокого порядка.

Изложенные обстоятельства, а также то, что перспективы улучшения пилотажных и летно-технических характеристик самолетов заключена в более глубокой автоматизации контура ручного управления, позволяющей реализовывать также принципиально новые формы движения самолетов (непосредственное управление подъемной и боковой силами), а значит и специфические динамические характеристики, в последние годы все большее внимание уделяется совершенствованию существующих и созданию новых показателей и методов оценки качества пилотажных характеристик самолетов с СУУ [2–8], в том числе и совершенствованию шкал качественной оценки пилотажных свойств самолета летчиком [6–11].

Целью работы является изучение существующих зарубежных и отечественных шкал пилотажных оценок самолетов, и на их основе, с учетом опыта проведения исследований с их применением в натурных экспериментах по оценке влияния параметров динамики самолета на качество его пилотирования летчиком и их нормирования, обоснование пятибалльной (привычной для отечественных исследователей градации оценок) шкалы качественной оценки пилотажных характеристик самолетов.

Обоснование системы показателей оценки качества пилотажных характеристик самолетов и формирование требований к ним предполагает проведения как теоретических, так и экспериментальных исследований взаимодействия в системе «летчик – самолет». Изучение такого взаимодействия в полете является задачей очень сложной и дорогостоящей.

Это связано, помимо соображений экономического характера и обеспечения безопасности полетов, с необходимостью исследования влияния на приемлемость для летчика изменения в широком диапазоне параметров самолета и режимов полета (в том числе и с целью определения граничных значений показателей устойчивости и управляемости) и со статистическим характером процесса управления при выполнении целевых задач пилотирования. Сам процесс пилотирования является случайным процессом, зависящим от индивидуальных особенностей летчика, случайных возмущений, действующих на самолет, и возникающих отклонений от заданной траектории в процессе управления. Поэтому его результаты (параметры движения самолета, работы силовой установки, управляющие воздействия летчика и отклонения рулевых поверхностей) регистрируются средствами бортовых измерений и подвергаются статистической обработке. Для получения достоверных результатов необходимо, чтобы по основным параметрам самолета и режима полета при многократных исследованиях была обеспечена хорошая повторяемость условий проведения экспериментов. К сожалению, в реальных полетах это условие выполнить практически невозможно.

В настоящее время для исследования динамики полета самолетов, рационального уровня автоматизации контура ручного управления, выбора параметров летательных аппаратов (ЛА), особенностей их поведения при отказах в системе управления, двигателей, на больших углах атаки, на критических режимах (сваливания, штопора и т. д.), отработки вопросов взаимодействия ручного и автоматического контуров управления широкое применение находят пилотажные стенды.

В отличие от авиационных тренажеров, имеющих фиксированную динамику конкретного самолета и предназначенных для обучения летного состава пилотированию на этом конкретном самолете, пилотажные стенды позволяют моделировать самолеты с разной динамикой (т. е. изменять в широком диапазоне параметры самолета и систем улучшения устойчивости и управляемости) с высокой степенью подобия реальному полету.

Моделирование на пилотажных стендах является важной составной частью создания и доводки самолета, дает большую экономию материальных средств и существенно сокращает сроки создания самолета. Однако оно не может полностью заменить летные испытания. Отработанные на пилотажных стендах доработки и рекомендации желательно параллельно проверить на самолетах – летающих лабораториях с изменяемыми (в том числе и в полете) характеристиками устойчивости и управляемости.

Весьма показательной в этом плане явилась программа создания воздушно-космического самолета «Буря». Благодаря уникальному по масштабу объему исследований на созданном в ЦАГИ специально для программы «Буря» подвижном стенде ПСПК-102 с шестью степенями свободы весь цикл летных испытаний этого самолета свелся всего лишь к 24 полетам средней продолжительностью примерно по 30 минут каждый,

и ни один из полетов не принес никаких неожиданных «сюрпризов», а лишь подтверждал расчетные и экспериментальные данные, полученные в аэродинамических трубах и на пилотажных стендах [12].

При проведении полунатурного моделирования (на пилотажных стендах) и при натуральных экспериментах (реальных полетах) получаемые результаты можно разделить на две категории:

объективные оценки, получаемые с помощью той или иной формализованной процедуры измерения и обработки результатов эксперимента;

субъективные оценки, выставляемые летчиком.

Объективные оценки – это, по своей сути, показатели устойчивости и управляемости. Количественные значения этих показателей, их принадлежность к определенному уровню характеристик устойчивости и управляемости устанавливаются путем соотнесения этих показателей качественной субъективной оценке летчика (ОЛ). Это связано с тем, что степень соответствия пилотажных характеристик ЛА задачам целевого назначения однозначно определяется оценкой летчика. Отзыв летчика о самолете, его характеристиках устойчивости и управляемости является конечной инстанцией в оценке приемлемости этих характеристик самолета его целевому назначению, соответствия характеристик психофизическим возможностям летчика.

Оценка летчиком качества пилотажных характеристик учитывает одновременно качество решения поставленной задачи пилотирования (точность) и степень затрат умственных и физических усилий (степень напряженности) летчика на ее выполнение.

Одну и ту же задачу, в зависимости от характеристик устойчивости и управляемости, летчик может выполнить с вполне определенной точностью и психофизической нагрузкой. Оценка летчиком качества пилотажных характеристик будет при этом разной. Тот самолет, на котором задача выполнена с большей точностью и при меньших затратах умственных и физических усилий летчика, получит более высокую оценку.

Поскольку оценка летчика является показателем технического совершенства самолета, то помимо эмоционального оттенка (отлично, хорошо, удовлетворительно, неудовлетворительно, плохо, очень плохо и т. д.) она должна быть выражена количественно. Это делает необходимым разработку определенного единообразного способа оценок в виде шкал с оценкой качества пилотирования самолета в виде баллов. Шкалы пилотажных оценок строятся по аналогии с принятыми системами школьных оценок. За рубежом, главным образом в США и странах НАТО, используется десятибалльная шкала оценок Купера–Харпера с обратным направлением отсчета (1 – отлично, 10 – невозможно выполнение полета). Одна из модификаций такой шкалы показана на рис. 1 [9]. У нас в стране наиболее часто применяется пятибалльная шкала пилотажных оценок (5 – отлично, 4 – хорошо и т. д.). На рис. 2 изображена 5-балльная шкала оценок, разработанная заслуженным летчиком-испытателем СССР В. И. Цуваревым [10–11].

Попытки использования в исследованиях шкалы Купера–Харпера вызвали у наших летчиков-испытателей и инженеров-исследователей серьезные трудности, прежде всего из-за непривычной градации и направления отсчета баллов. Шкала эмоциональной оценки (ШЕО) [10–11] также вызвала трудности в применении.

Дело в том, что шкала пилотажных оценок должна позволять осуществлять оценку пилотажных характеристик самолетов при полунатурном моделировании и летных исследованиях согласно принятой методологии нормирования (формирования требований) этих характеристик: назначение (класс самолета) → целевая задача (категория этапов полета) → качество выполнения задачи (уровень пилотажных характеристик) и безопасность полета на исследуемом режиме полета. Кроме того, шкала пилотажных оценок должна позволять оценивать приемлемость исследуемой конфигурации самолета для выполнения его назначения (а не сравнительной оценки этой конфигурации с другими конфигурациями), т. е. иметь абсолютное значение.

ШЕО не в полной мере отвечает этим требованиям. В большей мере ее целесообразно использовать при подготовке летной оценки по результатам летных испытаний. В ней сильный акцент сделан на эргономичных аспектах восприятия информации и работы летчика в кабине самолета. При исследованиях же по оценке влияния параметров динамики самолета на качество его пилотирования летчиком и их нормирование, должна прежде всего оцениваться приемлемость пилотажных характеристик для выполнения поставленной задачи, а не чувственно-эмоциональное впечатление летчика-эксперта от оцениваемого объекта – «нравится» или «не нравится».

В процессе проведения исследований на пилотажных стендах ЦАГИ им. проф. Н. Е. Жуковского по подготовке очередной редакции общих технических требований ВВС к авиационной технике была разработана, апробирована и в дальнейшем использована в экспериментах 5-балльная шкала качественной оценки пилотажных характеристик самолета (рис. 3). Она получила положительную оценку летчиков испытательного института ВВС, которые принимали участие в исследованиях.

Шкала качественной оценки пилотажных характеристик самолета разработана на тех же общих принципах построения и ранжирования оценок, что и шкала Купера–Харпера и ШЕО. Основной принцип построения состоит в том, что каждую оценку летчик формулирует (выставляет), выбирая из двух возможных альтернатив: «да» или «нет». Оценивая исследуемые характеристики в конкретном режиме полета (задании), эксперт должен последовательно ответить на поставленные вопросы и, руководствуясь стрелками, получить оценку в баллах. Шкала позволяет давать оценку с необходимой дробностью в баллах. Многочисленные эксперименты показали, что выставление дробной оценки при 5-балльной шкале с точностью до 0,1 балла не вызывало трудностей у большинства летчиков.

Наивысшую оценку получает самолет, который полностью соответствует решаемой задаче пилотирования

ШКАЛА ПИЛОТАЖНЫХ ОЦЕНОК САМОЛЕТА КУПЕРА-ХАРПЕРА

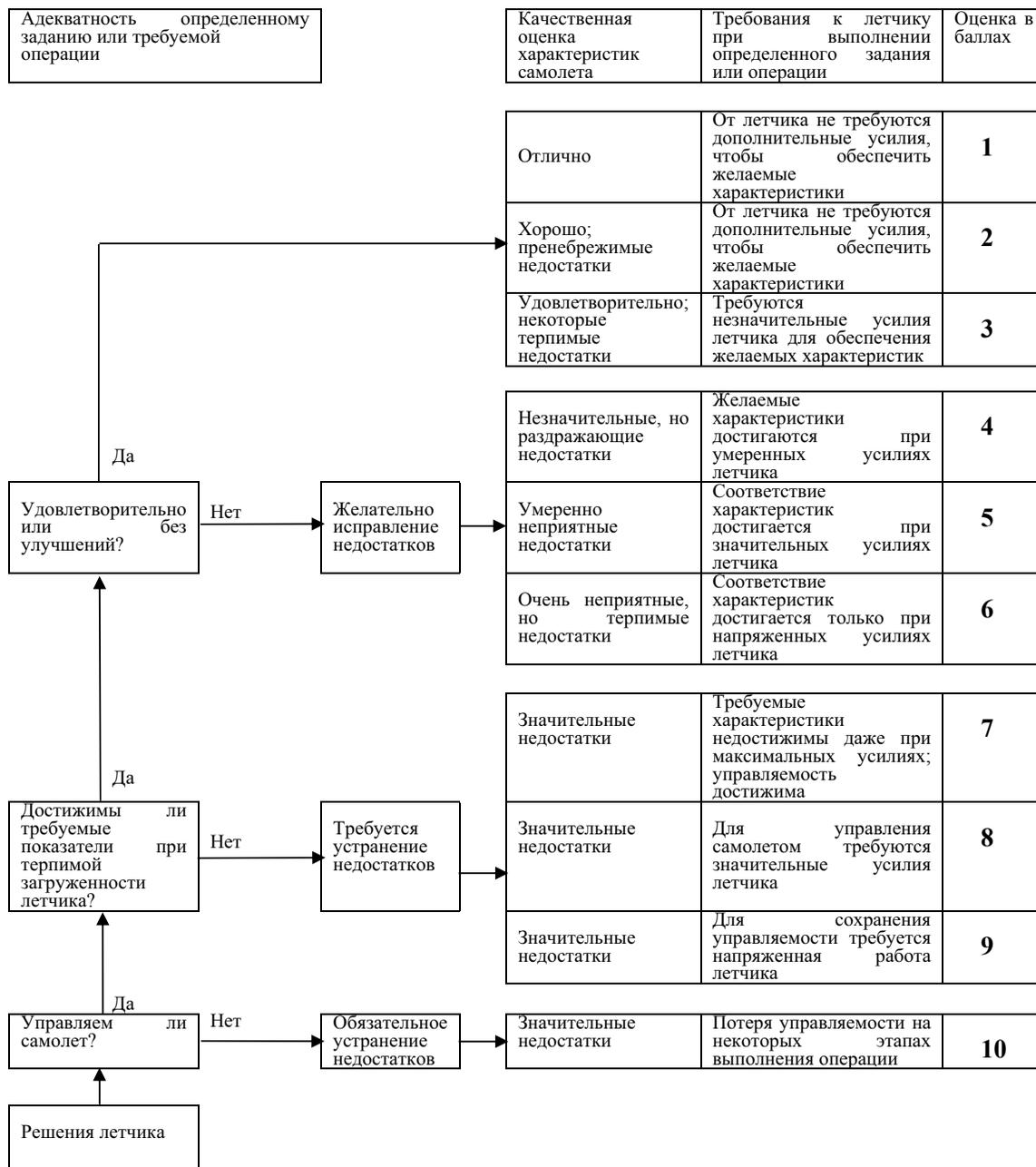


Рис. 1

ШКАЛА ПИЛОТАЖНЫХ ОЦЕНОК САМОЛЕТА В. И. ЦУВАРЕВА

	Словесная характеристика	Словесная оценка	Оценка в баллах
Нравится	Лучше трудно вообразить	Прекрасно	5,3 и более
	Лучше не бывает. Замечаний нет	Отлично	4,8–5,2
	Не ясно, бывает лучше или нет		4,3–4,7
	Есть замечания	Хорошо	3,8–4,2
Не ясно, нравится или нет			3,3–3,7
Не нравится	Не нравится, но допустимо	Посредственно	2,8–3,2
	Не ясно, допустимо или нет		2,3–2,7
	Не нравится	Плохо	1,8–2,2
	Не ясно, бывает хуже или нет		1,3–1,7
	Хуже не бывает	Очень плохо	0,8–1,2
	Хуже трудно вообразить	Безобразно	0,7 и менее

Рис. 2

и не требует компенсации недостатков. Самый низкий балл соответствует самолету, над которым в процессе управления теряется контроль даже при максимальной загрузке летчика. Ранжирование оценок по шкале выполняется в соответствии с вносимой летчиком в управление компенсацией недостатков (минимальной, умеренной, значительной и максимальной) для достижения одного из уровней качества решения целевой задачи пилотирования (отличное, хорошее, удовлетворительное).

Ранжирование уровней пилотажных характеристик в баллах **5- (ОЛ)** и **10-балльной (PR)** шкал пилотажных оценок осуществляется следующим образом:

- уровень 1 – $ОЛ = 5,0 \dots 3,5$ ($PR = 1 \dots 3,5$);
- уровень 2 – $ОЛ = 3,5 \dots 2,5$ ($PR = 3,5 \dots 6,5$);
- уровень 3 – $ОЛ = 2,5 \dots 0,5$ ($PR = 6,5 \dots 9$);
- уровень ниже 3 – $ОЛ < 0,5$ ($PR > 9$).

Балльные оценки дают хорошо повторяющиеся и стабильные результаты для широкого круга летчиков: от летчиков высшей квалификации – летчиков-испытателей до летчиков средней квалификации, эксплуатирующихся серийные самолеты.

Анализ результатов экспериментальных исследований [6] показал, что разные летчики оценивают один и тот же самолет приблизительно одинаково. Разброс оценок летчиков в баллах при 5-балльной шкале пилотажных оценок составляет $\Delta ОЛ = \pm 1$ балл, по 10-балльной шкале Купера–Харпера этот разброс составляет $\Delta PR = \pm 2$ балла. Следует иметь в виду, что оценки ЛА летчиком по этим шкалам имеют абсолютное значение, т. е. с их помощью оценивается приемлемость рассматриваемой конфигурации самолета для выполнения его целевого назначения, а не для сравнительной оценки этой конфигурации с другими конфигурациями.

Графа «Области пилотажных характеристик» содержит краткое описание характеристик с точки зрения степени пригодности самолета для массовой эксплуатации на исследуемом режиме полета. Например, оценка «3» означает краткую запись следующего вывода: «Безопасность полета на исследуемом режиме полета обеспечена. Исследуемые характеристики приемлемы для выполнения задач рассматриваемого этапа полета без коренных улучшений, но для полной приемлемости этих характеристик необходимо их некоторое улучшение с целью уменьшения загрузки летчика и/или повышения качества выполнения задачи». Графа «Области пилотажных характеристик» может быть непосредственно использована при написании летной оценки, материалов, выводов, заключений при проведении испытаний на устойчивость и управляемость, маневренность, боевое применение и т. д.

Летчик при оценке пилотажных характеристик, помимо выставления оценки этих характеристик в баллах, дает также комментарии и объяснения данной им оценки самолета. Именно дополнительные комментарии летчика позволяют понять выявленные недостатки или особенности самолета и принять необходимые меры для их устранения.

При проведении экспериментальных исследований в воздухе или на пилотажных стендах с участием летчиков следует выполнять следующие требования [7]:

должна быть четко сформулирована решаемая целевая задача (что должен делать летчик на борту самолета; условия или сопутствующие обстоятельства, при которых он должен выполнять свою задачу);

должны быть четко сформулированы ограничения выполняемого моделирования (определены соотношения между условиями моделирования и реальным полетом, должна быть ясность в том, какие существенные свойства полета не воспроизводятся);

комментарии летчик должен давать в наиболее простой форме. Он должен описывать свои ощущения, возникающие трудности в выполнении поставленного задания. Летчик должен давать пояснения по каждой рассматриваемой конфигурации самолета. Комментарии летчика желательно получать немедленно после или в процессе проведения эксперимента;

моделирование необходимо проводить со случайным предъявлением параметров и конфигураций самолета;

не следует ограничивать летчику время на оценку одного варианта конфигурации. Следует давать ему возможность анализировать рассматриваемую задачу столько времени, сколько ему это необходимо.

Выводы:

1. Многочисленные эксперименты на пилотажных стендах по исследованию разных динамических структур самолета с разным уровнем автоматизации контура ручного управления с использованием рассмотренной в статье шкалы качественной оценки пилотажных характеристик показали, что у летчиков разной квалификации не возникало никаких трудностей при работе с данной шкалой.

2. Шкала получила положительную оценку летчиков и может быть рекомендована при проведении исследований по оценке влияния параметров динамики самолета, его системы управления и системы улучшения устойчивости и управляемости на качество пилотирования летательного аппарата летчиком, формировании требований (нормированию) к характеристикам устойчивости и управляемости, разработке системы показателей и методов оценки качества пилотажных характеристик современных и перспективных самолетов с разным уровнем автоматизации контура ручного управления.

СПИСОК ССЫЛОК

1. Faller S. G., Moorhouse J. D. Perspectives of the flying qualities specification // AIAA Paper. 1982. № 1354. 8 p.
2. Hodgkinson J., La Manna W. J., Heyde J. L. Handling qualities of aircraft with stability and control augmentation systems a fundamental approach // The Aeronautical Journal. 1976. Vol. 80, I. № 782. Pp. 75–81.

ШКАЛА КАЧЕСТВЕННОЙ ОЦЕНКИ ПИЛОТАЖНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК САМОЛЕТА

ВОПРОС		ОЛ	ОБЛАСТИ ПИЛОТАЖНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК		Уровни	PR	Области режимов полета
Обеспечены ли управляемость, безопасность или хотя бы возможность ухода с опасного режима полета?	нет	-1	Область, где не обеспечена безопасность на исследуемом режиме полета	Нет возможности аварийного покидания	10	10	
	да		Не обеспечена безопасность и возможность ухода на второй круг	Есть возможность аварийного покидания			
Обеспечены ли безопасность и управляемость без изменения режима полета?	нет	0	Не обеспечена безопасность, но есть возможность ухода на второй круг				
да							
Выполнимы ли задачи исследуемого этапа полета (маневры по данному пункту полетного задания) хотя бы с максимальной нагрузкой летчика и/или со сниженным качеством?	нет	1	Задачи исследуемого этапа полета (маневры по данному пункту полетного задания) невыполнимы даже при максимальной нагрузке летчика и/или со сниженным качеством		У Р О З В Е Н Ь	9 8 7	Пределная область
да							
Допустимы ли исследуемые характеристики самолета для массовой эксплуатации без их коренного улучшения (в связи с недопустимой рабочей нагрузкой летчика и/или недопустимым качеством выполнения задачи)?	нет	2	Характеристики позволяют выполнять задачи исследуемого этапа полета, хотя бы с максимальной нагрузкой летчика и/или при сниженном качестве выполнения	Задачи исследуемого этапа полета (маневры по данному пункту полетного задания) выполняемы, но с недопустимой рабочей нагрузкой летчика и/или недопустимым качеством. Необходимо коренное улучшение	у р о з в е н ь	6 5 4	Эксплуатационная область
да							
Принемлемы ли полностью для массовой эксплуатации характеристики самолета без каких-либо улучшений? Или все же необходимо их некое улучшение для уменьшения нагрузки летчика и/или повышения качества выполнения задачи? (Отвечать на первый вопрос)	нет	3	Исследуемые характеристики приемлемы для выполнения задач исследуемого этапа полета (маневров по данному пункту задания) без коренных улучшений		У Р О З В Е Н Ь	3 2 1	Осп. эксплуат. область
да							
Имеются ли конкретные пожелания по улучшению исследуемых характеристик?	да	4	Характеристики полностью приемлемы для выполнения задания без коренных улучшений				
нет							
Имеются ли конкретные пожелания по улучшению исследуемых характеристик?	да	5	Область, где обеспечена безопасность на исследуемом режиме полета				
	нет						

Рис. 3

3. Neal T. P., Smith R. E. Development of flying qualities criterion for design of fighter flight control systems // AIAA Paper. 1970. № 70-927. 12 p.
4. Bailey R. E., Smith R. E. Analysis of augmented aircraft flying qualities through application of the Neal-Smith criterion // AIAA Paper. 1981. № 81-1776. 25 p.
5. Летчик как динамическая система в контуре управления летательным аппаратом // Обзор ОНТИ ЦАГИ. 1984. Вып. 635. 167 с.
6. Смирнов В. А., Нерубацкий В. Е. Нормирование и оценка качества пилотажных характеристик самолетов : моногр. – К. : ЦНИИ ВВТ ВСУ, 2013. 176 с.
7. Бюшгенс Г. С., Студнев Р. В. Аэродинамика самолета. Динамика продольного и бокового движения. М. : Машиностроение, 1979. 352 с.
8. Гуськов Ю. П., Загайнов Г. И. Управление полетом самолетов. М. : Машиностроение, 1980. 213 с.
9. Техническая информация / ЦАГИ. 1977. № 23.
10. Цуварев В. И. Летная оценка // Вестник МНАПЧК. 2005. № 2 (18). С. 46–59.
11. Сильвестров М. М., Козиоров Л. М., Пономаренко В. А. Автоматизация управления летательными аппаратами с учетом человеческого фактора. М. : Машиностроение, 1986. 184 с.
12. Аэродинамика, устойчивость и управляемость сверхзвуковых самолетов / под ред. Г. С. Бюшгенса. М. : Наука. Физматлит, 1998. 816 с.

Рецензент О. О. Расстригин, д-р техн. наук,
старший науч. співробітник
(Центральный научно-исследовательский институт
вооружения и военной техники
Вооруженных Сил Украины)