

ОБОСНОВАНИЕ АВТОМАТИЗАЦИИ УПРАВЛЕНИЯ ВОЕННО-ТРАНСПОРТНЫМ САМОЛЁТОМ В УСЛОВИЯХ ДЕСАНТИРОВАНИЯ МОНОГРУЗОВ

Верещиков Д.В., Кузнецов А.Д.*

*Военно-воздушная академия им. профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина,
ул. Старых Большевиков, 54а, Воронеж, 394064, Россия*

** e-mail: adkuznetsov@yandex.ru*

Рассмотрены вопросы автоматизации управления военно-транспортным самолётом в условиях десантирования моногрузов на основе применения современных адаптивных алгоритмов.

Ключевые слова: военно-транспортный самолёт, десантирование моногрузов, устойчивость, управляемость, система управления полётом самолёта, автоматизация.

Введение

В настоящей работе под парашютным десантированием грузов и техники (рис. 1) понимается процесс вывода десантируемых грузов и техники из грузовой кабины с помощью вытяжного парашюта и перемещения их вблизи военно-транспортного самолёта (ВТС) до выхода из зоны возможного соударения с ним.

Под моногрузом понимается десантируемый груз (единица боевой техники), масса которого составляет более 7% массы ВТС.

Парашютное десантирование моногрузов с ВТС является оперативным способом их доставки в удалённые и труднодоступные районы. Такой способ доставки в связи со значительным изменением центровки ВТС в процессе выхода моногруза из гру-



Рис. 1. Парашютное десантирование моногруза

зовой кабины требует от лётчика быстрых и координированных движений командными рычагами управления, концентрации внимания на управлении самолетом и, таким образом, усложняет пилотирование.

В связи с рядом обстоятельств эта проблема только обостряется. Во-первых, наблюдается расширение номенклатуры и рост потребной массы десантируемых моногрузов. Наиболее ярко об этом свидетельствует процесс эволюции боевой машины десанта. Повышение её боевой эффективности сопровождается увеличением массы (см. таблицу) [1].

Характеристики	БМД-1	БМД-2	БМД-3	БМД-4	БМД-4М
Год принятия на вооружение	1969	1985	1990	2004	2016
Показатель боевой эффективности	1	2,8	4	7	7
Масса со средствами десантирования, кг	8700	9000	14400	16100	13900

Во-вторых, расширяется высотно-скоростной диапазон десантирования. Так, диапазон высот применения существующих средств десантирования составляет 300—4000 м, однако, например, во время военной операции в Сирии доставка грузов в осаждённые районы производилась с высоты более 5000 м из-за опасности поражения ВТС переносными зенитно-ракетными комплексами [2]. Рассматривается возможность «воздушного старта» (запуска космических аппаратов с борта ВТС на больших высотах) и десантирования спасательных катеров [3]. Отдельного рассмотрения заслуживает беспарашютное десантирование методом срыва со сверхмалых высот (5 ± 2 м) [4], когда пилотирование ещё больше усложняется из-за непосредственной близости земли.

Решить проблему сложности пилотирования возможно с помощью автоматизации (частичной или полной). Однако на ВТС Ил-76МД (специально предназначенном для десантирования) в процессе десантирования моногруза предусмотрено только ручное пилотирование в продольном канале. На перспективном ВТС Ил-76МД-90А автоматизация управления также отсутствует.

Таким образом, имеется противоречие между возрастающей сложностью пилотирования ВТС и нереализованностью современных достижений теории и практики систем автоматического управления самолётами на существующих и перспективных ВТС, предназначенных для десантирования моногрузов.

Постановка задачи

Для разрешения указанного противоречия требуется научно-методическое обоснование необхо-

димости и возможности автоматизации управления ВТС при десантировании. В этой связи объектом исследования выступает процесс управления ВТС в процессе десантирования моногруза, а предметом исследования — его автоматизация.

Задачи исследования:

1. Раскрыть суть проблемы выхода параметров полёта ВТС за пределы эксплуатационных ограничений при десантировании моногруза.

2. Проанализировать факторы, влияющие на пилотирование ВТС при десантировании.

3. Рассмотреть существующие способы решения проблемы выхода параметров полёта ВТС за пределы эксплуатационных ограничений при десантировании моногруза.

4. Проанализировать возможные пути автоматизации ВТС при десантировании.

Суть проблемы выхода параметров полёта за пределы ограничений

При движении моногруза внутри фюзеляжа под действием силы вытяжного парашюта появляется дестабилизирующий момент тангажа, вызванный резким и значительным изменением центровки ВТС. При невмешательстве лётчика в управление этот дестабилизирующий момент приводит к изменению углов атаки, тангажа (угол наклона траектории в связи со скоротечностью процесса практически не изменяется) и нормальной перегрузки. В момент полного выхода моногруза появляется мгновенное положительное приращение нормальной перегрузки, вызванное резким уменьшением массы ВТС, сопровождающееся его «вспуханием», а затем плавным переходом на пикирование. Лётчик в этих условиях должен стремиться удержать самолёт в горизонтальном полёте. Ему необходимо парировать кабрирующий момент, возникающий при движении моногруза по грузовой кабине, и пикирующий момент, возникающий при его сходе с обреза грузового люка [5]. Позднее парирование кабрирующего момента может привести к выходу самолёта на угол атаки, близкий к критическому. Результаты математического моделирования продольного движения ВТС при фиксированном управлении (рис. 2) подтверждают вышеизложенное [6].

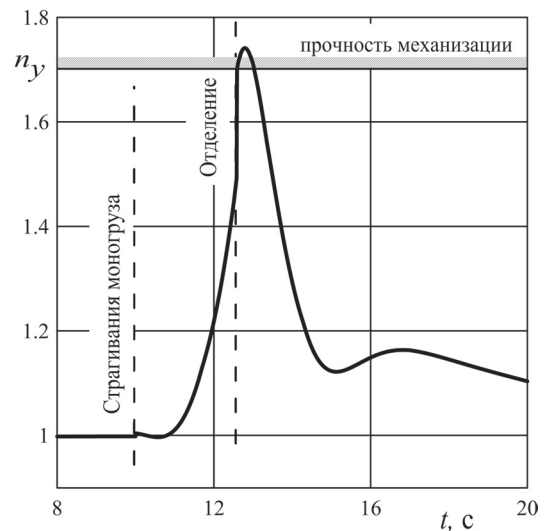
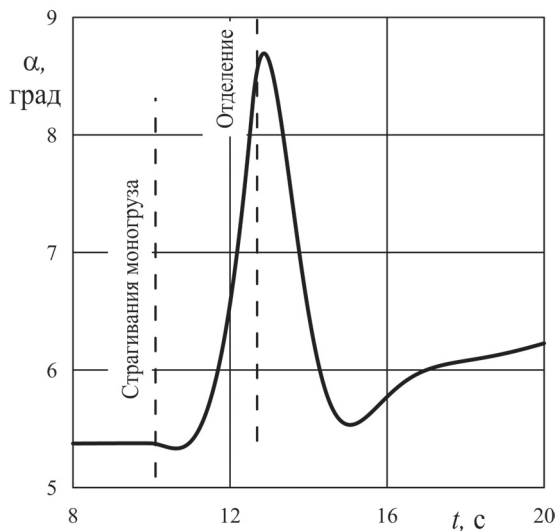


Рис. 2. Изменения нормальной перегрузки и угла атаки

Анализ факторов, влияющих на пилотирование

На возмущённое движение ВТС при десантировании моногруза оказывают существенное влияние следующие факторы [5]:

- приборная скорость полёта;
- положение механизации крыла;
- масса груза и его исходное положение в грузовой кабине;
- осевой момент инерции ВТС без груза;
- характеристики продольного демпфирования ВТС;
- запас продольной статической устойчивости ВТС;
- психофизические возможности лётчика.

Рассмотрим влияние каждого фактора подробнее.

Параютное десантирование происходит на приборных скоростях 260—400 км/ч с выпущенной механизацией крыла. Минимальное значение скорости ограничивается обеспечением необходимого запаса угла атаки до сваливания и устойчивостью работы вытяжной парашютной системы. Максимальное значение скорости ограничивается прочностью существующих парашютных систем.

Выпуск механизации крыла приводит, с одной стороны, к уменьшению угла атаки горизонтального полёта на малых скоростях, а с другой — к сужению эксплуатационного диапазона нормальных перегрузок. Так, при убранной механизации этот диапазон составляет от $-0,6$ до 2 единиц. При выпущенной механизации в положении $\delta_3 / \delta_{np} = 30^\circ / 25^\circ$ эксплуатационный диапазон сужается и находится в пределах от $-0,6$ до 1,7 единиц в зависимости от веса ВТС и приборной скорости (рис. 3).

Переднее положение груза в грузовой кабине, а также увеличение его массы способствует увеличению возмущений по углу атаки и нормальной перегрузке.

Осевой момент инерции ВТС без груза I_z , аэродинамический демпфирующий момент и запас продольной статической устойчивости препятствуют увеличению скорости тангажа во время десантирования. Таким образом, результатом действия этих моментов является уменьшение возмущений по углу атаки и нормальной перегрузке.

При выполнении десантирования лётчик стремится стабилизировать исходный угол тангажа. Однако его вмешательство в управление может способствовать раскачке самолёта в продольном канале. Причиной раскачки является психофизические особенности деятельности лётчика как оператора в контуре управления ВТС, а также его возможности по приёму, переработке информации и реализации управляющих воздействий. Согласно

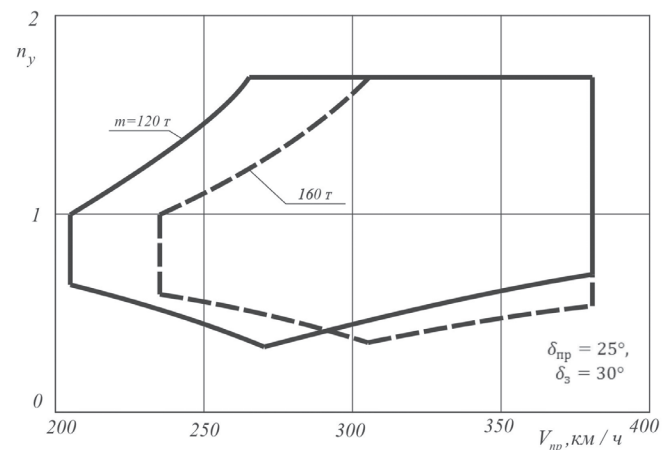


Рис. 3. Диаграмма нормальных перегрузок

проведённым исследованиям [7], при пилотировании самолёта лётчик запаздывает при вмешательстве в управление и адаптируется к изменяющимся свойствам самолёта как объекта управления. При изменении центровки и массы ВТС быстро и значительно изменяются характеристики продольной статической управляемости (рис. 4), поэтому лётчик не успевает адаптироваться и обеспечить точное дозирование управляющих воздействий, что в совокупности с его характерным запаздыванием и способствует раскачке по тангажу.

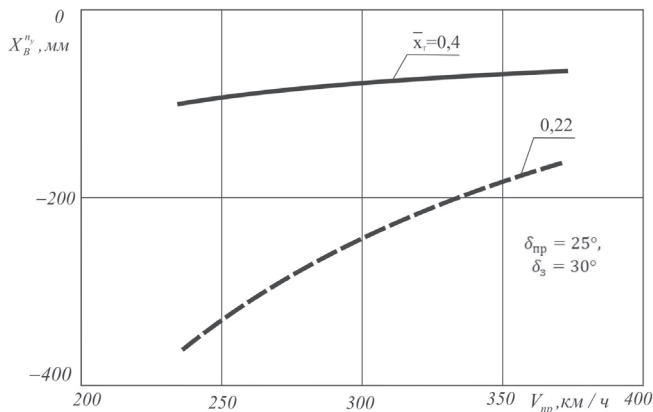


Рис. 4. Изменение градиента отклонения штурвала по перегрузке

Существующие способы решения проблемы

Традиционным решением проблемы устойчивости и управляемости при десантировании моногрузов является применение рациональной аэродинамической компоновки ВТС (Ан-12, Ил-76). Главная её особенность — относительно большая по сравнению с пассажирскими самолётами площадь горизонтального оперения, что обеспечивает мощное демпфирование в продольном канале, но вместе с тем и снижает аэродинамическое качество ВТС.

Сброс моногруза при выполнении маневра «горка» с нормальной перегрузкой $n_y = 0,2 \dots 0,4$ (в режиме «пониженной весомости») [3], а также при наборе высоты позволяет уменьшить силу реакции пола грузовой кабины и тем самым уменьшить дестабилизирующий момент. Недостатком этого способа является ограниченность его применения при полётах в боевых порядках.

Использование специальной методики пилотирования с упреждением [6] в целом позволяет безопасно десантировать парашютным способом моногрузы массой более 14 т. Один из вариантов её реализации при десантировании трёх грузов заключается в следующем (рис. 5):

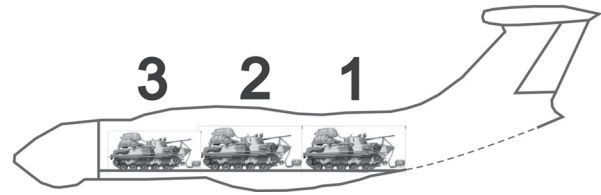


Рис. 5. Схема размещения моногрузов

— при выполнении сброса первого груза, после его страгивания, штурвал перемещается в направлении «от себя» на четверть полного хода. После выхода груза штурвал возвращается в нейтральное положение;

— после страгивания второго груза штурвал перемещается «от себя» на треть полного хода, после выхода груза штурвал возвращается в нейтральное положение;

— аналогично для третьего груза — половину полного хода перемещения штурвала «от себя» и далее — в нейтральное положение.

Недостатками методики пилотирования с упреждением являются:

— влияние приборной скорости, массы ВТС, начальной центровки, конструктивных различий ВТС с точки зрения необходимых расходов штурвала (по этой причине к моменту написания настоящей статьи прорабатывалось 7 вариантов методики для одинаковой номенклатуры моногрузов);

— разброс управляющих действий штурвалом «от себя», запаздывание реакции лётчика и его непроизвольные ошибочные действия;

— невозможность применения при беспарашютном десантировании.

Таким образом, результаты исследований показывают, что на сегодняшний момент система «ВТС — лётчик» вышла на пределы своих возможностей по устойчивости и управляемости при сбрасывании моногрузов массой свыше 15 т с высот более 400 м парашютным способом и 8 т — со сверхмалых высот беспарашютным способом. Поэтому очевидно, что процесс управления ВТС при десантировании моногруза подлежит автоматизации.

Целесообразно отметить, что за время эксплуатации самолётов Ил-76 не было ни одного авиационного инцидента из-за ошибочных действий лётчика в процессе парашютного десантирования моногрузов массой менее 9 т. По этой причине не было необходимости в автоматизации управления. Кроме того, на базе аналоговой системы автоматического управления САУ-1Т-2Б самолёта Ил-76 автоматизация практически невозможна в виду её ограниченных возможностей при реализации сложных алгоритмов управления. В настоящее время

экипажу Ил-76 запрещается использовать продольный канал САУ и включать автомат перестановки стабилизатора при десантировании.

Анализ возможных путей автоматизации

Для анализа применимости тех или иных путей автоматизации будем полагать, что необходимо обеспечить автоматическую стабилизацию углового положения самолёта, компенсируя возникающие при движении моногруза по грузовой кабине десантирующие моменты. При этом лётчик осуществляет управление только траекторией полёта ВТС, освобождаясь от необходимости парирования высокочастотных возмущений, вызванных движением грузов.

Рассмотрим возможность применения основных принципов (способов) автоматического управления [8]:

- программного управления;
- управления с обратной связью;
- управления с компенсацией;
- комбинированного управления.

Полагаем, что закон движения груза, а также изменение центровки заранее не известны и зависят от силы, действующей со стороны вытяжного парашюта, и кинематических параметров движения ВТС. В условиях заранее не известных возмущений принцип программного управления неприменим.

Использование принципа обратной связи уже реализовано в системах автоматического управления в продольном канале. Управляемой величиной является угол тангажа ϑ . Типовой закон управления рулём высоты в режиме «Стабилизация угла тангажа» имеет вид

$$\delta_B = k_B^\vartheta (\vartheta - \vartheta_3) + k_B^{\omega_z} \omega_z, \quad (1)$$

где ϑ , ϑ_3 — соответственно заданное и текущее значение угла тангажа; k_B^ϑ , $k_B^{\omega_z}$ — коэффициенты усиления.

Особенности реализации закона (1) заключаются в следующем. Во-первых, управляющее воздействие начинает вырабатываться и оказывать влияние на угловое движение ВТС только после отклонения ϑ от ϑ_3 . Во-вторых, для эффективной работы в условиях десантирования требуются максимальные значения передаточных чисел. Однако их приходится ограничивать для обеспечения устойчивости замкнутого контура управления «ВТС—САУ» с учётом изменения характеристик объекта управления (ВТС). Перечисленные особенности не позволяют эффективно использовать этот закон для

полной компенсации возмущающего момента, действующего на ВТС. Также необходимо учитывать изменение ϑ_3 за счёт уменьшения массы ВТС при десантировании моногрузов.

Принцип компенсации, при котором определяется (измеряется) значение возмущающего момента и на этой основе вырабатывается управляющее воздействие, позволяет полностью или частично компенсировать влияние соответствующих возмущений. Такой подход позволяет обеспечить парирование возмущающих факторов, а не последствий их проявления. Этот принцип успешно реализован на многих отечественных и зарубежных самолётах при автоматическом отклонении аэродинамических поверхностей для парирования возмущающих моментов при выпуске механизации (Ту-22М3), при изменении режима работы двигателей (Ту-204), при отказе силовой установки (Ту-95МС) и др. Трудность реализации принципа компенсации при десантировании моногруза связана с необходимостью надёжной и достоверной оценки (расчёта) возмущающего момента.

Таким образом, авторам представляется целесообразным использование принципа комбинированного управления, осуществляемого с использованием закона управления рулём высоты в виде

$$\delta_B = k_B^\vartheta (\vartheta - \vartheta_3) + k_B^{\omega_z} \omega_z + \delta_{B\text{кор}}, \quad (2)$$

где $\delta_{B\text{кор}}$ — корректирующее отклонение руля высоты для парирования возмущающего момента. Остальные обозначения соответствуют выражению (1).

Для достоверного определения $\delta_{B\text{кор}}$ целесообразно воспользоваться методами параметрической идентификации в темпе управления. Данные методы были разработаны ещё в середине XX века, однако практическая их реализация на борту самолёта в темпе управления стала возможной благодаря интенсивному развитию цифровых вычислителей в составе электродистанционной системы управления [9], в том числе и на неманевренных самолётах (Ту-204, RRJ-100 и др.). Самолёты Су-30СМ и Як-130 являются примерами успешной реализации адаптивных алгоритмов на основе параметрической идентификации в продольном канале управления.

На самолёте Су-30СМ применен адаптивный алгоритм управления стабилизатором с коррекцией управляющего сигнала с ручки управления самолётом (РУС) по тангажу на основании сравнения реакции самолёта по нормальной перегрузке с поведением эталонной модели, сформированной в

виде звена 2-го порядка [10]. Принципиальная схема представлена на рис. 6 [11].

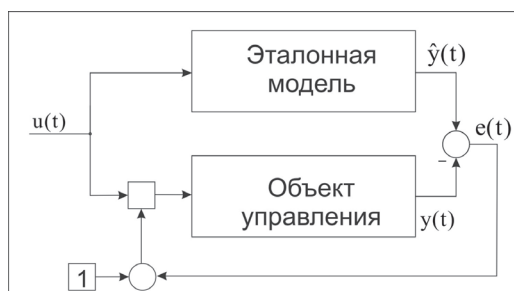


Рис. 6. Схема адаптивной системы с эталонной моделью: $u(t)$ — сигнал управления; $y(t)$ — выходной сигнал; $\hat{y}(t)$ — выходной сигнал, вычисленный на основании оценок параметров объекта управления; $e(t)$ — ошибка воспроизведения выходного сигнала

На самолете Як-130 [12] применен адаптивный алгоритм управления стабилизатором с идентификацией в темпе управления трех параметров, характеризующих аэродинамические характеристики самолета (рис. 7) [11].

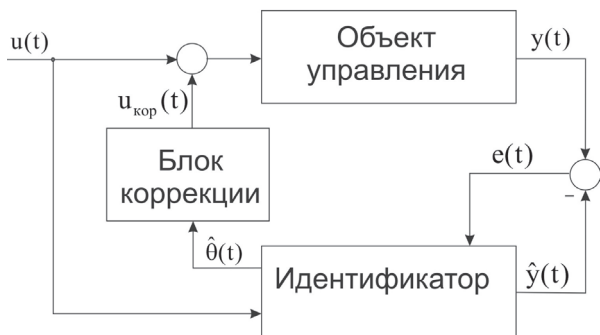


Рис. 7. Схема адаптивной система с идентификатором: $\hat{\theta}(t)$ — вектор оценок параметров объекта управления; $u_{кор}(t)$ — корректирующий сигнал

Идентификация осуществляется на основе использования рекуррентного метода наименьших квадратов и реализована в составе комплексной системы управления (КСУ) самолетом. Алгоритм продольного канала КСУ Як-130 классифицируется как адаптивный с настраиваемой моделью. Использование адаптивного алгоритма на ВТС при десантировании позволит оценивать возмущающий момент в темпе управления, сформировать сигнал $\delta_{Вкор}$ и тем самым реализовать закон управления (2).

Выводы

На основании проведенного анализа проблемы выхода параметров полёта ВТС за пределы эксплу-

атационных ограничений при десантировании моногруза и рассмотрения факторов, влияющих на данный процесс, обоснована необходимость совершенствования автоматизации управления в этих условиях. В результате анализа существующих способов решения указанной проблемы и возможных путей совершенствования автоматизации управления обоснована возможность использования адаптивных алгоритмов управления с текущей идентификацией [13].

Библиографический список

1. *Барятинский М.Б.* Боевые машины десанта: Приложение к журналу «Моделист-конструктор». URL: <http://vipbook.info/nauka-i-ucheba/voyna/10714-bronekollekcija.-boevye-mashiny-desanta.html>
2. *Валецкий О.В., Пономаренко О.Ю.* Переносные зенитные ракетные комплексы. — М.: Изд-во «Центр стратегической конъюнктуры», 2016. — 64 с.
3. *Таликов Н.Д.* Самолет Ил-76 и его транспортные модификации. // Авиация и космонавтика. 2003. № 4. URL: <http://profilib.com/chtenie/132614/zhurnal-aviatsiya-i-kosmonavtika-2003-04-lib.php>
4. *Таликов Н.Д.* Предельно малые высоты. Работы по десантированию грузов и военной техники из военно-транспортного самолета Ил-76 с предельно малых высот. 2009. URL: http://desantura.ru/articles/36/?SHOWALL_1=1
5. *Верещиков Д.В., Кузнецов А.Д., Шинькарук А.С.* Проблемы устойчивости и управляемости военно-транспортного самолёта в условиях сброса моногруза // Авиакосмические технологии—2013: Труды XIV Всероссийской научно-технической конференции и школы молодых ученых, аспирантов и студентов. Воронеж: Фирма «Элистр». 2013. С. 367 — 373.
6. *Филиппов В.В., Белянин А.И., Бонч-Бруевич Г.Ф.* и др. Аэродинамика и динамика полета транспортных самолетов с ДТРД и ТВД / Под общ. ред. В.В. Филиппова. — М.: Воениздат, 1981. — 416 с.
7. *Бюшгенс Г.С., Студнев Р.В.* Динамика продольного и бокового движения. — М.: Машиностроение, 1979. — 352 с.
8. *Ким Д.П.* Теория автоматического управления. — М.: Физматлит, 2003. — Т.1. Линейные системы. — 288 с.
9. *Бюшгенс Г.С.* Аэродинамика и динамика полета магистральных самолетов. — М.—Пекин: Издательский отдел ЦАГИ — Авиа-издательство КНР, 1995. — 765 с.
10. *Костин П.С., Верещиков Д.В., Верещагин Ю.О.* Адаптивные системы управления современных и перспективных самолетов // Авиакосмические технологии (АКТ-2012): Труды XIII Всероссийской научно-технической конференции и школы молодых учёных, аспирантов и студентов (Москва 17 октября 2012, Таруса 18-19 октября 2012). Воронеж: Элит, 2012. 171 с.

11. Ким Д.П. Теория автоматического управления. — М.: Физматлит, 2004. — Т.2. Многомерные, нелинейные, оптимальные и адаптивные системы. — 462 с.
12. Костин П.С., Верещиков Д.В., Верещагин Ю.О., Кузнецов А.Д. Принцип реализации адаптивного управления маневренным самолетом на основе текущей идентификации его характеристик // Вестник Военно-воздушной академии. 2014. №1(20). С. 87-92.
13. Егорчев М.В., Козлов Д.С., Тюменцев Ю.В. Идентификация аэродинамических характеристик летательного аппарата: нейросетевой полуэмпирический подход // Вестник Московского авиационного института. 2014. Т.21. №4. С. 13-24.

JUSTIFICATION OF MILITARY TRANSPORT AIRCRAFT CONTROL AUTOMATION IN CONDITIONS OF HEAVY CARGO AIRLIFT DELIVERY

Vereshchikov D.V., Kuznetsov A.D.*

*Air force academy named after professor N.E. Zhukovskii and Yu.A. Gagarin,
54a, Starykh Bol'shevikov str., Voronezh, 394064, Russia*

* e-mail: adkuznetsov@yandex.ru

Abstract

Heavy cargo parachuting off an aircraft is the fastest way to deliver it to the uttermost remote and hard-to-reach areas. However, the pilot faces difficulties steering an aircraft while discharging a heavy cargo, due to the aircraft center of mass considerable changes. This problem aggravates now for several reasons. Firstly, the weight increase of heavy cargo, armored vehicles in particular. Secondly, the increase of speed range and dumping heights. The possibility of an "air start", i. e. a spacecraft airplane launching at high altitudes, as well as rescue vessels air drop is considered. A free drop from deck levels of 5 ± 2 m is rather difficult due to the earth immediate proximity.

The possible solution to the piloting complexity problem consists in automation of this process. It is necessary to justify scientifically and methodologically the need and possibility of an aircraft control automation while heavy cargo extraction. Thus, the object of the study is the process of aircraft control while a heavy cargo extraction, and the subject of the study is its automation.

The research task are as follows:

1. Revealing the gist of the problem of the MTA flight parameters violation of operating limitations while heavy cargo extraction.
2. Analysis of the factors affecting the MTA piloting while airlift delivery.
3. Considering the existing ways of solving the problem of the MTA flight parameters violation of operating limitations while heavy cargo extraction.
4. Analysis of the possible ways of MTA automation while airlift delivery.

The need for flight control automation was proved based on the study of the MTA flight parameters violation of operating limitations while heavy cargo extraction and consideration of the factors affecting this process. The results of the analysis of the existing ways of the abovementioned problem solution and possible ways of flight control automation allowed develop adaptive control algorithms for aircraft control while heavy cargo extraction.

It must be emphasized, that the detailed analysis of the abovementioned problem and rational ways of its solving under modern conditions were made for the first time and, furthermore, it seems expedient to carry out further studies on developing the automation technique based on adaptive algorithms with current identification.

Keywords: military transport aircraft, heavy cargo airlift delivery, stability, controllability, aircraft flight control system, automation.

References

1. Baryatinskii M.B. *Boevye mashiny desanta*, available at: <http://vipbook.info/nauka-i-ucheba/voyna/10714-bronekollekcija.-boevye-mashiny-desanta.html>
2. Valetskii O.V., Ponomarenko O.Yu. *Perenosnye zenitnye raketnye komplekсы* (Portable anti-aircraft missile systems), Moscow, Tsentr strategicheskoi kon'yunktury, 2016, 64 p.
3. Talikov N.D. *Aviatsiya i kosmonavtika*, 2003, no. 4, available at: <http://profilib.com/chtenie/132614/zhurnal-aviatsiya-i-kosmonavtika-2003-04-lib.php>
4. Talikov N.D. *Predel'no malye vysoty. Raboty po desantirovaniyu gruzov i voennoi tekhniki iz voenno-transportnogo samoleta Il-76 s predel'no malykh vysot*,

- available at: http://desantura.ru/articles/36/?SHOWALL_1=1
5. Vereshchikov D.V., Kuznetsov A.D., Shin'karuk A.S. *Aviakosmicheskie tekhnologii-2013. Materialy XIV Vserossiiskoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii i shkoly molodykh uchenykh, aspirantov i studentov*, Voronezh, 2013, pp. 367 - 373.
 6. Filippov V.V., Belyanin A.I., Bonch-Bruevich G.F. *Aerodinamika i dinamika poleta transportnykh samoletov s DTRD i TVD* (Aerodynamics and dynamics of flight of transport planes), Moscow, Voenizdat, 1981, 416 p.
 7. Byushgens G.S., Studnev R.V. *Dinamika prodol'nogo i bokovogo dvizheniya* (Dynamics of longitudinal and lateral movement), Moscow, Mashinostroenie, 1979, 352 p.
 8. Kim D.P. *Teoriya avtomaticheskogo upravleniya* (Automatic control theory), Moscow, Fizmatlit, 2003, vol. 1, 288 p.
 9. Byushgens G.S. *Aerodinamika i dinamika poleta magistral'nykh samoletov* (Aerodynamics and flight dynamics of mainline aircraft), Moscow – Pekin, TsAGI - Avia-izdatel'stvo KNR, 1995, 765 p.
 10. Kostin P.S., Vereshchikov D.V., Vereshchagin Yu.O. *Trudy XIII Vserossiiskoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii i shkoly molodykh uchenykh, aspirantov i studentov "Aviakosmicheskie tekhnologii (AKT-2012)" (Moscow 17 October 2012, Tarusa 18-19 October 2012)*, Voronezh, Elit, 2012, pp. 171.
 11. Kim D.P. *Teoriya avtomaticheskogo upravleniya* (Automatic control theory), Moscow, Fizmatlit, 2004, vol. 2, 462 p.
 12. Kostin P.S., Vereshchikov D.V., Vereshchagin Yu.O., Kuznetsov A.D. *Vestnik Voenno-vozdushnoj akademii*, 2014, no. 1 (20), pp. 87–92.
 13. Egorchev M.V., Kozlov D.S., Tyumentsev Yu.V. *Vestnik Moskovskogo aviatsionnogo instituta*, 2014, vol. 21, no. 4, pp. 13-24.