

# ДИНАМИКА, БАЛЛИСТИКА, УПРАВЛЕНИЕ ДВИЖЕНИЕМ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

---

УДК 629.735.33

DOI: 10.34759/vst-2021-1-137-146

## АВТОМАТИЗАЦИЯ КАНАЛА УПРАВЛЕНИЯ СКОРОСТЬЮ ПРИ ДОЗАПРАВКЕ САМОЛЕТА В ВОЗДУХЕ

Чебакова А.А.\* , Ганяк О.И.\*\* , Ткаченко О.И.\*\*\*

*Центральный аэрогидродинамический институт  
им. профессора Н.Е. Жуковского (ЦАГИ),  
ул. Жуковского, 1, Жуковский, Московская область, 140180, Россия*

*\* e-mail: angelina.tchebakova@yandex.ru*

*\*\* e-mail: ganyak@tsagi.ru*

*\*\*\* e-mail: tkachenko15@mail.ru*

Статья поступила в редакцию 18.01.2021

---

Дозаправка самолета в ручном управлении является одним из самых сложных и напряженных режимов пилотирования для летчиков. С помощью автоматизации удается повысить вероятность успешного контакта штанги и конуса по сравнению с ручным управлением.

*Ключевые слова:* дозаправка самолета в воздухе, автоматическая дозаправка в воздухе, автомат тяги, заправочный конус, заправочная штанга, автоматизация канала управления скоростью.

---

### Введение

В настоящее время для увеличения дальности и продолжительности полета самолетов применяется дозаправка топливом в воздухе [1, 2]. К большинству современных самолетов, как к маневренным [3, 4], так и к неманевренным [6], предъявляются требования возможности дозаправки топливом в воздухе, что позволяет существенно повысить их летные характеристики. В связи с развитием и активным применением беспилотной авиации вопрос о реализации дозаправки летательных аппаратов в воздухе стал еще более актуальным.

Режим дозаправки самолетов в ручном управлении является одним из самых сложных и напряженных режимов пилотирования [7, 8, 10] и требует от летчика высокой квалификации и длительных тренировок.

Особенно это усложняется рядом негативных факторов, таких, как:

- турбулентность воздушного потока [2, 9];
- колебания системы штанга—конус под воздействием турбулентного воздушного потока [1, 5];
- воздействие спутного следа самолета-заправщика на заправляемый самолет [12, 14, 19];

— влияние обтекания воздушным потоком заправляемого самолета на поведение заправочного конуса [13] и т.д.

Необходимость обеспечения безопасности выполнения режима дозаправки топливом в полете обусловила интерес к отработке этого режима полета на пилотажных стендах. Выполнено достаточно большое число исследований, среди которых можно отметить работы [20, 21].

С помощью автоматизации [18] удается повысить вероятность успешного контакта по сравнению с ручным управлением (для легких самолетов, например, примерно в два раза) [4, 11, 15, 16]. Одним из направлений упрощения этого процесса может быть автоматизация канала управления скоростью.

Целью выполненной работы является разработка предложений по автоматизации канала управления скоростью в процессе дозаправки самолета в воздухе, которые должны снизить загруженность летчика, обеспечить выполнения задачи и тем самым повысить безопасность полета. В статье рассматривается алгоритм управления скоростью на наиболее ответственных этапах режима дозаправки самолета в воздухе:

- подход самолета к заправщику;
- непосредственно процесс контактирования штанги и конуса;
- выход в рабочее положение для перекачки топлива;
- отход от заправщика (танкера) по окончании заправки;
- повторный заход для контактирования при ошибке установления контакта штанги и конуса.

Данный алгоритм управления скоростью предполагает наличие информации об относительном положении заправляемого самолета и танкера на всех указанных выше этапах процесса дозаправки. Информацию об относительном положении предполагается получить благодаря применению систем технического зрения [22, 23], которые должны позволить определить расстояние от штанги до конуса и универсального подвесного агрегата заправки (УПАЗа) танкера.

Следует отметить, что за рубежом в автоматизации процессов дозаправки летательных аппаратов значительно продвинулись вперед. Так, первые летные испытания системы автоматической дозаправки в простых условиях полета проведены были в 2006 г. [24].

### Алгоритм формирования сигнала заданной относительной скорости самолета и танкера в автомате тяги

Автоматизация управления скоростью при дозаправке в воздухе должна осуществляться через автомат тяги путем включения в его алгоритм закон формирования заданной относительной скорости самолета и танкера  $\Delta V_{ДЗ\_зад}$  на основе их взаимного положения, точного взаимного положения заправочных штанги и конуса  $\Delta x_{шт-к}$ , заправочной штанги и УПАЗа  $\Delta x_{шт-УПАЗ}$  (или некоего элемента на задней кромке крыла в зоне УПАЗа) после контакта и при перекачке топлива. При этом в автомате тяги заданная скорость заправляемого самолета задается на основе заданной воздушной скорости танкера  $V_{танк\_зад}$  в виде (рис. 1)

$$V_{зад} = V_{танк\_зад} + \Delta V_{ДЗ\_зад}.$$

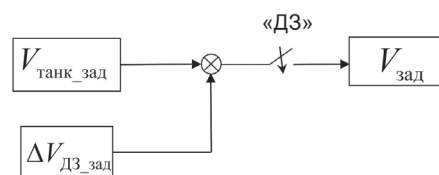


Рис. 1. Формирование заданной скорости заправляемого самолета для отработки автоматом тяги

При формировании алгоритмов управления скоростью в автомате тяги при дозаправке следует учитывать различные состояния и этапы процесса дозаправки:

- на этапе сближения: выпуск заправочной штанги, перестройка алгоритмов системы на режим «дозаправка»;
- выдерживание относительной скорости сближения при контактировании в заданных пределах;
- при контакте заправочной штанги и конуса — дальнейшее сближение самолета и танкера до положения, соответствующего безопасному положению при перекачке топлива, и полет самолета и заправщика в процессе перекачки топлива с выдерживанием безопасного положения двух самолетов и соответствующего натяжения шланга УПАЗа;
- по завершении процесса перекачки — расцепление заправочной штанги и конуса и отход

самолета от танкера, уборка заправочной штанги и переход на полетный алгоритм системы управления самолетом;

— при срыве контактирования заправочной штанги и конуса — отход самолета от танкера на заданное расстояние и повтор выполнения контактирования.

При формировании алгоритма автомата тяги предлагается ввести следующие ключи:

— ДЗ — признак выпуска заправочной штанги и перехода алгоритмов системы управления для дозаправки

$$ДЗ = \begin{cases} 0, & \text{нет включения режима дозаправки,} \\ 1, & \text{режим дозаправки включен,} \end{cases}$$

данный признак формируется на заправляемом самолете;

— ДЗ\_К — признак контакта заправочной штанги и конуса, который принимает значения

$$ДЗ_К = \begin{cases} 0, & \text{нет контакта,} \\ 1, & \text{есть контакт,} \end{cases}$$

данный признак формируется в системе управления УПАЗом на танкере и передается на заправляемый самолет;

— ДЗ\_Е — признак конца перекачки топлива, принимает значения

$$ДЗ_Е = \begin{cases} 0, & ДЗ_К = 0, \\ 0, & ДЗ_К = 1, \text{ перекачка топлива не закончена,} \\ 1, & ДЗ_К = 1, \text{ перекачка топлива закончена,} \end{cases}$$

данный признак формируется в системе управления УПАЗом на танкере и передается на заправляемый самолет;

— ДЗ\_В — признак возврата при неудачной стыковке заправочной штанги и конуса в положение для повтора выполнения контактирования:

$$ДЗ_В = \begin{cases} 0, & ДЗ_К = 0, \\ 0, & \end{cases}$$

данный признак формируется на заправляемом самолете.

$$\Delta V_{ДЗ\_зад} =$$

$$= \begin{cases} f_1(\Delta x_{шт-к}) \\ \text{при } ДЗ=1, ДЗ_К=0, ДЗ_Е=0, ДЗ_В=0; \\ f_2(\Delta x_{шт-УПАЗ}) \\ \text{при } ДЗ=1, ДЗ_К=1, ДЗ_Е=0, ДЗ_В=0; \\ f_3(\Delta x_{шт-к}) \\ \text{при } ДЗ=1, ДЗ_К=1, ДЗ_Е=1, ДЗ_В=0; \\ f_4(\Delta x_{шт-к}) \\ \text{при } ДЗ=1, ДЗ_К=0, ДЗ_Е=0, ДЗ_В=1. \end{cases}$$

Функция  $f_1(\Delta x_{шт-к})$  определяет заданную относительную скорость заправляемого самолета и танкера  $\Delta V_{ДЗ\_зад}$  на этапе сближения до момента контактирования штанги и конуса, функция  $f_2(\Delta x_{шт-УПАЗ})$  определяет  $\Delta V_{ДЗ\_зад}$  на этапе сближения самолета и танкера до положения, соответствующего безопасному положению при перекачке топлива, функция  $f_3(\Delta x_{шт-УПАЗ})$  определяет  $\Delta V_{ДЗ\_зад}$  на этапе расцепления заправочной штанги и конуса и отхода самолета от танкера по завершении процесса перекачки, функция  $f_4(\Delta x_{шт-к})$  определяет  $\Delta V_{ДЗ\_зад}$  при срыве контактирования заправочной штанги и конуса и обеспечивает отход самолета от танкера на заданное расстояние для выполнения попытки повторного контактирования. Задание  $f_2$  и  $f_3$  от расстояния штанги до УПАЗа  $\Delta x_{шт-УПАЗ}$  связано с тем, что при стыковке штанги и конуса расстояние между ними равно нулю, т.е.  $\Delta x_{шт-к} = 0$ .

Вид предлагаемых функций  $f_1, f_2, f_3, f_4$  приведен на рис. 2. В принятой модели положению штанги и конуса  $\Delta x_{шт-к} = 0$  соответствует положение штанги и УПАЗа  $\Delta x_{шт-УПАЗ} = -30$  м.

Выбор значений  $\Delta V_{ДЗ\_зад}$  для функций  $f_1, f_2, f_3, f_4$  определяется на основании требований, установленных в ходе испытаний процесса дозаправки самолета в воздухе.

Поскольку значения  $\Delta V_{ДЗ\_зад}$  не превышают значения 10 км/ч, то при расчетах и моделирова-

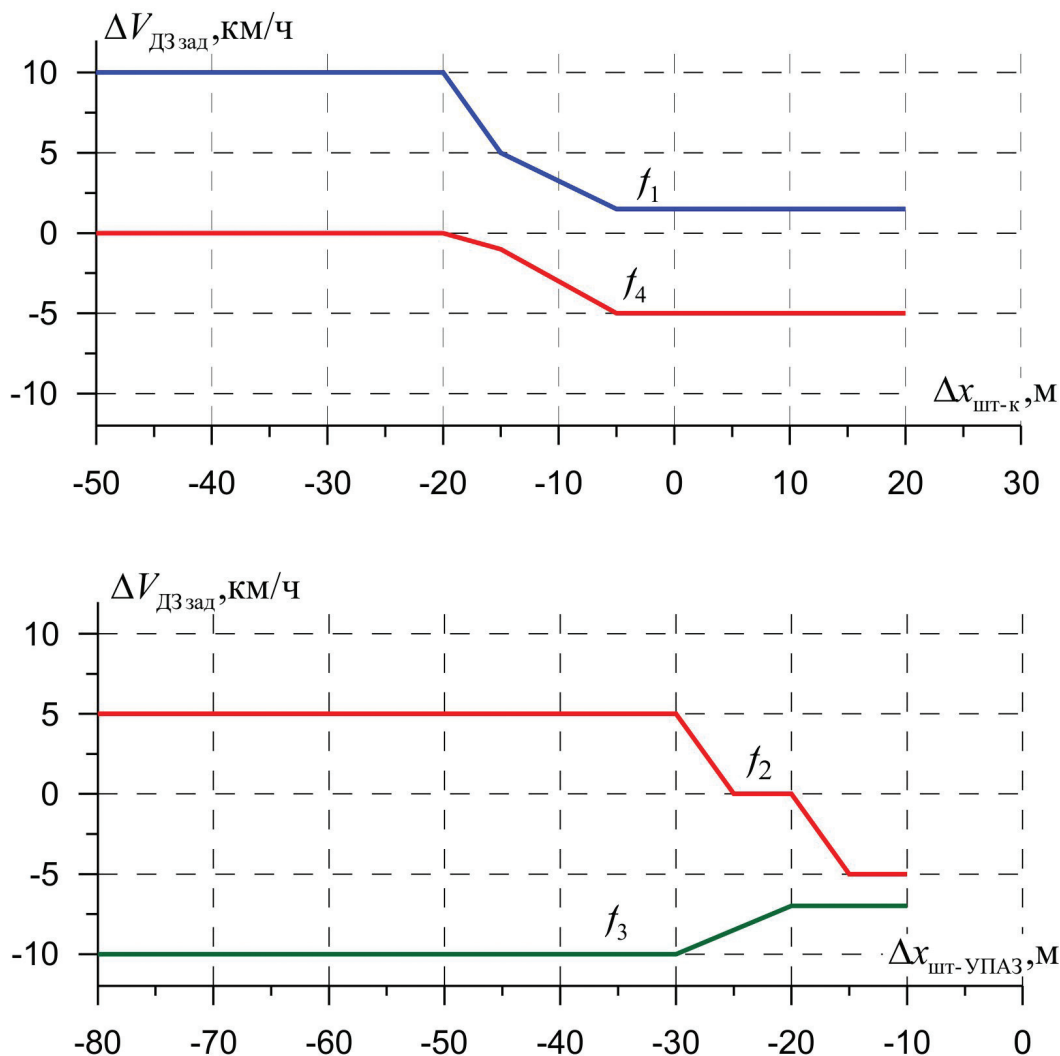


Рис. 2. Вид предлагаемых функций алгоритма формирования сигнала для автомата тяги

нии динамику изменения тяги двигателя можно рассматривать в виде звена первого порядка с постоянной времени  $T_{ДВ}$ . Переключения функций  $f_1, f_2, f_3, f_4$  для отработки автоматом тяги величины  $\Delta V_{ДЗ\_зад}$  по данным взаимного положения заправочных штанги и конуса  $\Delta x_{шт-к}$  и заправочной штанги и УПАЗа  $\Delta x_{шт-УПАЗ}$  определяются на основе математического и полунатурного моделирования и уточняются должны на основе летного эксперимента.

Пример реализации формирования сигнала  $\Delta V_{ДЗ\_зад}$  для автомата тяги по сигналам  $\Delta x_{шт-к}$  и  $\Delta x_{шт-УПАЗ}$  при сближении и успешном контакте штанги и конуса ( $ДЗ\_К=1$ ), выходе заправляемого самолета в зону безопасного совместного полета

с самолетом-заправщиком, удерживании его в этой зоне и расцеплении штанги и конуса по окончании заправки приведен на рис. 3:

$ДЗ\_К$  – признак контакта заправочной штанги и конуса;

$\Delta x_{шт-к}$  – расстояние между заправочной штангой и конусом;

$\Delta x_{шт-УПАЗ}$  – расстояние между заправочной штангой и УПАЗ;

$\Delta V_{ДЗ\_зад}$  – заданная относительная скорость самолета и танкера;

$\Delta G_{топ}$  – вес перекаченного топлива.

На приведенных примерах вес перекаченного топлива и скорость перекачки приведены условно.

Пример реализации формирования сигнала  $\Delta V_{ДЗ\_зад}$  для автомата тяги по сигналам  $\Delta x_{шт-к}$  и

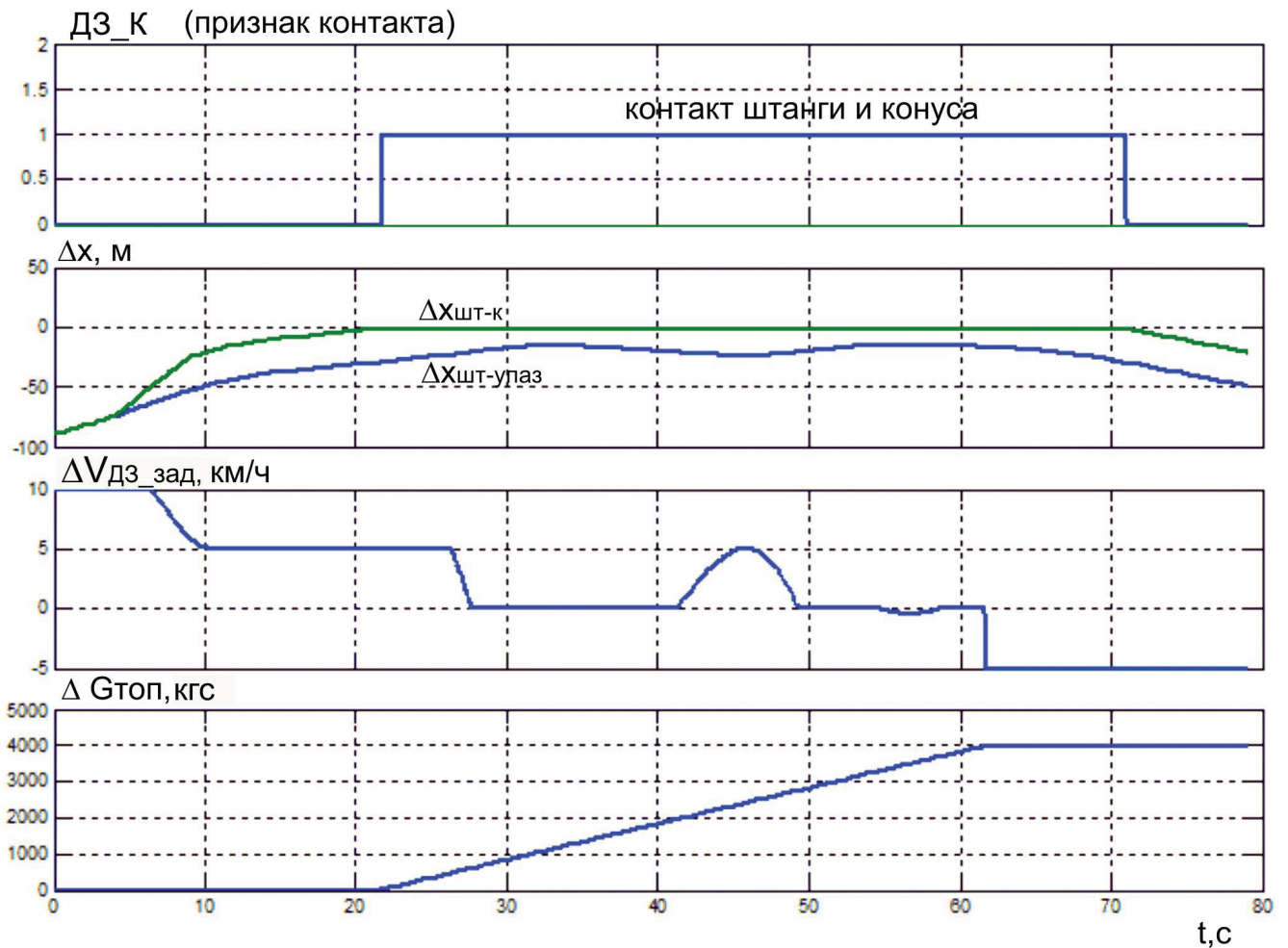


Рис. 3. Пример реализации формирования сигнала  $\Delta V_{ДЗ\_зад}$  для автомата тяги по сигналам  $\Delta x_{шт-к}$  и  $\Delta x_{шт-УПАЗ}$  при сближении и контакте штанги и конуса

$\Delta x_{шт-УПАЗ}$  при сближении, первоначальном промахе при контактировании штанги и конуса ( $ДЗ\_В=1$ ), отходе заправляемого самолета от танкера для повторной попытки контакта и после успешного контактирования ( $ДЗ\_К=1$ ) выходе в зону безопасного совместного полета с самолетом заправщиком, удерживании его в этой зоне и расцеплении штанги и конуса по окончании заправки приведен на рис. 4. На данном рисунке, помимо указанных выше параметров, приведен параметр  $ДЗ\_В$ , вырабатываемый при неудачном контактировании и необходимости выхода для выполнения повторной попытки контакта штанги и конуса.

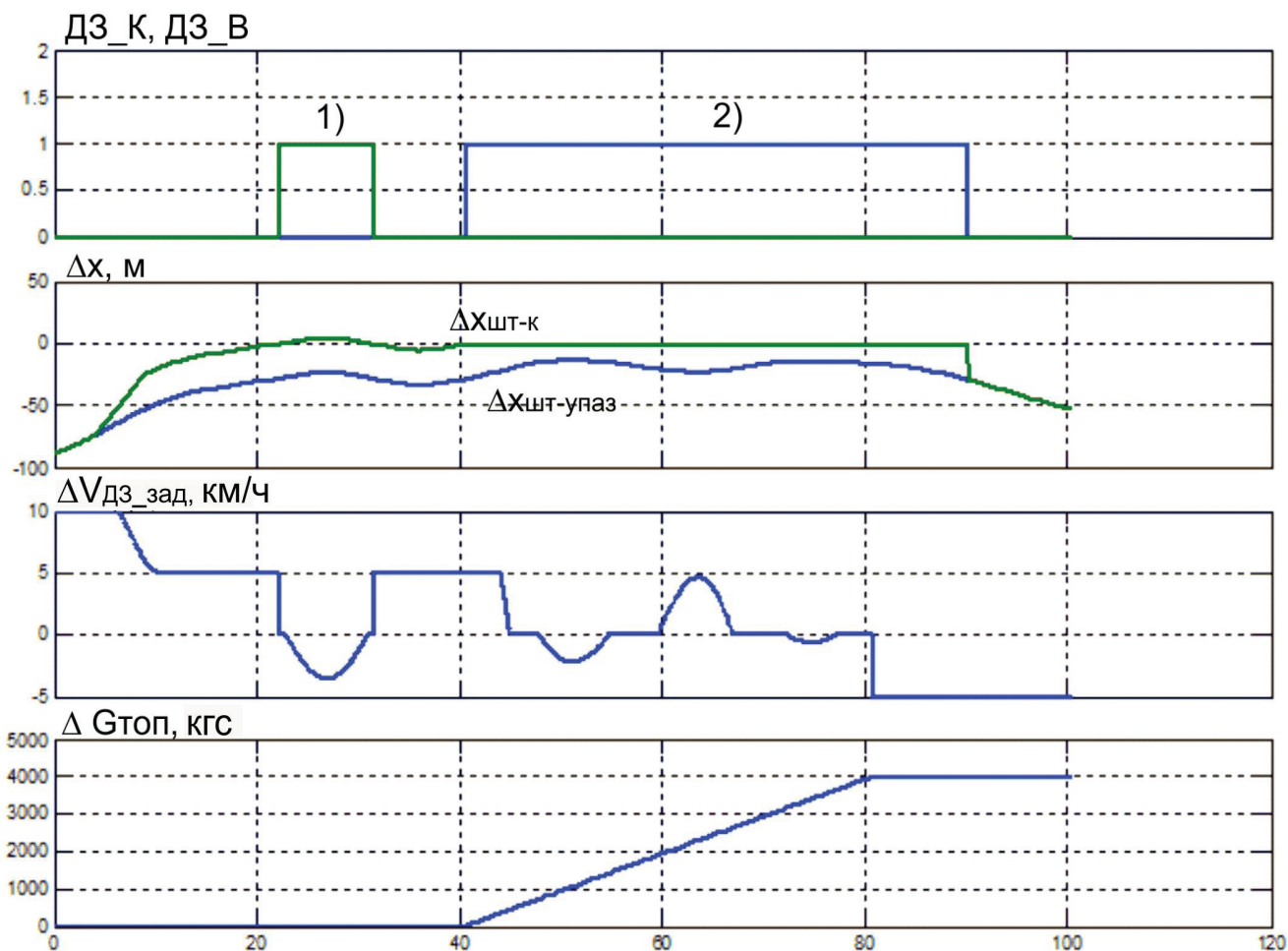
При отработке алгоритма формирования сигнала  $\Delta V_{ДЗ\_зад}$  для автомата тяги использована модель процесса дозаправки, разработанная для пилотажных стендов ПС-10М и ПСПК-102 ЦАГИ [17], которая учитывает динамику движения за-

правляемого самолета и самолета танкера, а также шланга с заправочным конусом [2].

Предварительная оценка эффективности предлагаемого алгоритма проведена путем моделирования процесса дозаправки самолета в воздухе на пилотажном стенде ПС-10М ЦАГИ. Пример отображения внешней обстановки из кабины стенда и вида на процесс сближения самолета и танкера, формируемого системой визуализации стенда, приведен на рис. 5.

При моделировании на стенде рассматривался процесс дозаправки при начальном расстоянии между самолетами  $\sim 100$  м, приборной скорости танкера 600 км/ч, начальное рассогласование скоростей самолетов 0–10 км/ч. Радиус заправочного конуса 0,25 м.

При моделировании рассматривался процесс управления самолетом путем отклонения рычагов управления оператором и управление скоростью полета посредством автомата тяги. Формирование



- 1) - ДЗ\_В=1 -возврат для повторной попытки осуществления контакта
- 2) - ДЗ\_К=1 -контакт штанги и конуса

Рис. 4. Пример реализации формирования сигнала  $\Delta V_{ДЗ\_зад}$  для автомата тяги по сигналам  $\Delta x_{шт-к}$  и  $\Delta x_{шт-УПАЗ}$  при сближении штанги и конуса, промахе при попытке контакта, повторном сближении и контакте штанги и конуса

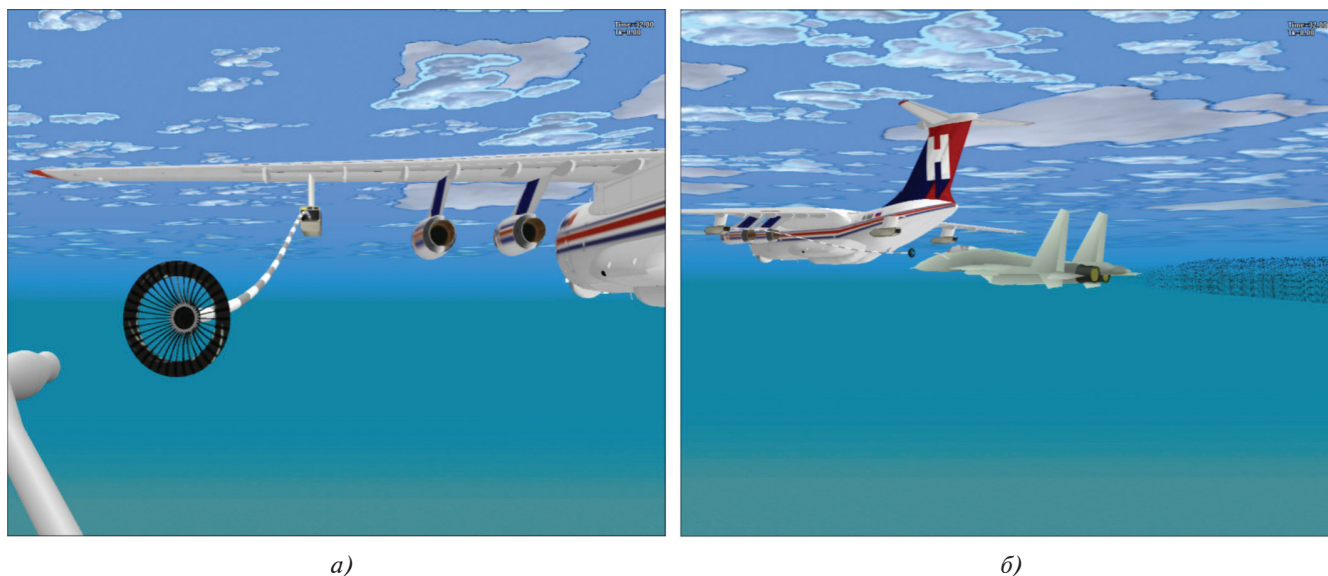


Рис. 5. Пример отображения внешней обстановки на пилотажном стенде: а — вид из кабины управляемого самолета; б — внешний вид на процесс дозаправки самолета в воздухе

сигнала  $\Delta V_{ДЗ\_зад}$  для автомата тяги происходило в соответствии с рассмотренным в работе алгоритмом, а также вручную оператором путем отклонения кньюппеля, с помощью которого оператор корректировал заданную скорость полета. В процессе моделирования было выполнено по 20 реализаций процесса дозаправки самолета в воздухе для каждого варианта управления заданной скоростью сближения. При сравнении результатов моделирования, представленных в таблице, оценивались средние значения отклонения штанги от центра заправочного конуса  $\overline{\Delta y}$ ,  $\overline{\Delta z}$  и относительной скорости сближения  $\overline{\Delta V}$  в момент предполагаемого контакта штанги и заправочного конуса, а также их среднеквадратичные отклонения  $\sigma_{\Delta y}$ ,  $\sigma_{\Delta z}$ ,  $\sigma_{\Delta V}$ .

#### Сравнение результатов моделирования

	$\sigma_{\Delta y}$ , м	$\sigma_{\Delta z}$ , м	$\overline{\Delta V}$ , м/с	$\sigma_{\Delta V}$ , м/с
Задание $\Delta V_{ДЗ\_зад}$ в соответствии с предложенным алгоритмом	0,17	0,16	1,57	0,28
Задание $\Delta V_{ДЗ\_зад}$ оператором	0,21	0,18	1,56	0,56

Из анализа представленных результатов моделирования следует, что применение рассматриваемого в работе алгоритма задания  $\Delta V_{ДЗ\_зад}$  позволяет повысить точность контактирования, уменьшить разброс относительных скоростей при контакте и тем самым обеспечить стабильность успешного выполнения маневра. Кроме того, применение алгоритма задания  $\Delta V_{ДЗ\_зад}$  существенно упрощает выдерживание положения самолета относительно заправщика в процессе перекачки топлива.

Следует отметить, что недостатком пилотажного стенда ПС-10М является отсутствие стереоскопического отображения внешней обстановки при моделировании процесса дозаправки самолета в воздухе. Установки со стереоскопическим отображением внешней обстановки [20] позволяют моделировать процесс дозаправки в воздухе более корректно. Тем не менее, полученные при моделировании на стенде ПС-10М результаты демонстрируют перспективность рассмотренного в ра-

боте подхода по автоматизации управления скоростью при выполнении данного режима полета.

#### Выводы

Для реализации алгоритма автоматизации управления заправляемого самолета необходима информация о взаимном положении заправочных штанги и конуса, а также заправочной штанги и УПАЗа (или некоторого элемента на задней кромке крыла в зоне УПАЗа) на всех этапах дозаправки. Для обеспечения автономности дозаправки самолета в воздухе источником такой информации может служить система технического зрения, работающая на борту заправляемого самолета в реальном масштабе времени.

Предлагаемый алгоритм формирования сигнала автомата тяги может рассматриваться в дальнейшем как элемент обеспечения автоматической дозаправки самолета в воздухе.

#### Библиографический список

1. Курбесов В.Д. Исследование возможности автоматизации процесса контактирования самолетов при заправке топливом в полете // Труды ЛИИ. 1976. № 299. С. 1–27.
2. Чеглаков Д.И. История исследований в области автоматизации процесса дозаправки топливом в воздухе летательных аппаратов // Новый Университет. Сер. Технические науки. 2011. №4. С. 34–47.
3. Марбашев К.Х., Иванов Ю.Л., Маранов А.А., Чернов Л.Г. Самолет сверхзвуковой с системой дозаправки. Патент RU 45837 U1, 27.07.1999. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=40743096>
4. Орлов С.В., Чеглаков Д.И. Разработка алгоритма КСУ-941(941УБ) в режиме «Дозаправка» // Инновации в авиастроении: Сб. работ 1-й научно-практической конференции. 2010. С. 130–142.
5. Ярошевский В.А. Методика моделирования движения шланга с заправочным конусом в процессе дозаправки самолета в воздухе // Ученые записки ЦАГИ. 2003. Т. XXXIV. № 3-4. С. 91–108.
6. Поединок В.М. Алгоритм управления самолетом при дозаправке в воздухе в автоматическом режиме // Ученые записки ЦАГИ. 2005. Т. XXXVI. № 1-2. С. 95–102.

7. *Поединок В.М.* Влияние ошибок определения взаимного положения заправочного конуса и заправочной штанги на точность контакта при автоматической дозаправке // Ученые записки ЦАГИ. 2010. Т. XLI. №6. С. 54–61.
8. *Поединок В.М.* Оценка влияния конструктивных и аэродинамических характеристик заправочной системы шланг—конус на ее динамические свойства и точность контакта при автоматической дозаправке // Ученые записки ЦАГИ. 2012. Т. XLIII. №1. С. 97–110.
9. *Бабкин В.И., Белоцерковский А.С., Турчак Л.И.* Системы обеспечения вихревой безопасности полетов летательных аппаратов. — М.: Наука, 2008. — 372 с.
10. *Тихонов В.Н., Корсун О.Н., Бондаревская Л.Е.* Статистические характеристики пилотирования при заправке топливом в полете // Проблемы безопасности полетов. 2009. №3. С. 47–57.
11. *Оболенский Ю.Г., Похваленский В.Л., Чеглаков Д.И.* Алгоритм автоматического управления летательным аппаратом при дозаправке топливом в воздухе // Труды МАИ. 2013. № 65. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=35966>
12. *Вышинский В.В.* Эволюция струйно-вихревого следа за пассажирским самолетом // Аэромеханика и газовая динамика. 2003. № 4. С. 23–31.
13. *Анимица О.В., Свириденко Ю.Н.* Моделирование динамики шланга и конуса в процессе заправки самолета топливом в полете // Труды ЦАГИ. Выпуск 2717. М.: Издательский отдел ЦАГИ, 2012. С. 3–13.
14. *Анимица О.В., Гайфуллин А.М., Рыжов А.А., Свириденко Ю.Н.* Моделирование на пилотажном стенде дозаправки самолета в полете // Труды МФТИ. 2015. Т. 7. № 1(25). С. 3–15.
15. *Чеглаков Д.И.* Управление маневренным самолетом при дозаправке топливом в воздухе // Наука и образование: Научное издание МГТУ им. Н.Э. Баумана 2013. №1. С. 235–244. URL: <http://technomag.edu.ru/doc/500331.html>
16. *Орлов С.В., Чеглаков Д.И.* Алгоритм комплексной системы управления самолета МиГ-29К/КУБ в режиме дозаправки топливом в воздухе // Молодежь и будущее авиации и космонавтики — 2010: Сборник аннотаций II межотраслевого молодежного научно-технического форума. СПб.: Принт-салон, 2011. С. 62.
17. *Зайчик Л.Е., Десятник П.А., Желонкин В.И., Желонкин М.В., Ткаченко О.И., Яшин Ю.П.* Влияние подвижности кабины пилотажного стенда на моделирование задачи дозаправки самолёта топливом в воздухе // Вестник Московского авиационного института. 2017. Т. 24. № 2. С. 86–94.
18. *Матвеев А.В., Бобронников В.Т.* Методика проектирования систем управления летательных аппаратов с использованием среды программирования MATLAB/Simulink // Вестник Московского авиационного института. 2009. Т. 16. № 4. С. 53–61.
19. *Исаев В.К., Золотухин В.В.* Некоторые задачи 2D-маневрирования самолета с целью обеспечения вихревой безопасности // Вестник Московского авиационного института. 2009. Т. 16. № 7. С. 5–10.
20. *Тяглик М.С., Ефремов А.В., Тищенко А.Н., Тяглик А.С.* Программное обеспечение стереоскопической системы визуализации для моделирования задачи дозаправки топливом в полете от самолета типа ИЛ-78 («Visual Refueling IL-78»). Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ RU 2019660061. Бюл. №8, 30.07.2019.
21. *Журавский К.А., Верещиков Д.В., Макаренко В.Н.* О результатах полунатурного моделирования динамики неманевренного самолета при дозаправке топливом в полете // Инновационные технологии в образовательном процессе: Сборник трудов XVIII Всероссийской научно-практической конференции. 2016. С. 90–94.
22. *Корепанов С.Е.* Комплексный алгоритм обнаружения и оценки параметров объектов в системе технического зрения, предназначенной для относительной навигации летательных аппаратов при дозаправке в воздухе // Вестник РГРТУ. 2016. № 56. С. 114–123.
23. *Корепанов С.Е.* Алгоритмы обнаружения объектов и оценивания их траекторных параметров с использованием канала технического зрения бортовых систем обработки информации и управления: Автореф. дисс. ... канд. техн. наук. — Рязань, 2016. — 22 с.
24. *Hanlon M.* World's first hand-off autonomous air refueling engagement. 2006. URL: <http://www.gizmag.co.uk/6144>



## SPEED CONTROL CHANNEL AUTOMATION WHILE AIRCRAFT AERIAL REFUELING

**Chebakova A.A.\* , Ganyak O.I.\*\* , Tkachenko O.I.\*\***

*Central Aerohydrodynamic Institute named after N.E. Zhukovsky (TsAGI),  
1, Zhukovsky str., Zhukovsky, Moscow Region, 140180, Russia*

*\* e-mail: angelina.tchebakova@yandex.ru*

*\*\* e-mail: ganyak@tsagi.ru*

*\*\*\* e-mail: tkachenko15@mail.ru*

### Abstract

Currently, aerial refueling is being employed to increase the aircraft flight range and duration. Refueling an aircraft in manual actuation through all control channels is one of the most difficult and stressful modes of piloting for a pilot, and requires high qualification and long training.

This is being especially complicated by negative factors such as:

- The tanker aircraft trail line impact on the aircraft being fueled;
- The airstream turbulence, etc.

Automation allows increasing the probability of successful contact compared to manual actuation (for example, about twofold for a light aircraft). One of the trends unburdening a pilot, and simplifying this process may be automation of the speed control channel.

The article considers the speed control algorithm at all stages of the aircraft aerial refueling mode:

- The aircraft's approach to the tanker;
- Directly the process of a drogue and a cone contacting;
- Taking working position for the fuel pumping;
- Separation from the tanker after refueling completion;
- Re-entry for contacting when the hose and cone contact performing failed.

The purpose of the article consists in the speed control algorithm development at all stages of the aircraft aerial refueling mode.

The main objectives of the article are as follows:

- Increasing the flight duration;
- Reducing the burden on the pilot, and lowering the requirements for his qualification;
- Increasing the probability of successful aircraft refueling from the first approach;
- Refueling performing in conditions of air-turbulence;
- Improving flight safety.

Speed control automation while aerial refueling should be performed through auto-throttle. Its algorithm should include the law of the specified relative speed of the aircraft and tanker, based on their mutual position. To be more exact, it means the mutual position of drogue and cone, as well as drogue and a certain element on the trailing edge in the area of the unit installation after the contact and while fuel pumping.

While the algorithm developing, classical approaches to flying vehicles' control systems design, mathematical modelling methods and simulation on the flight simulator were employed.

Simulation results on the flight simulator revealed the operability of the algorithm ensuring speed control of the aircraft being fueled relative to the tanker.

A system of technical vision, operating in real-time scale onboard the aircraft being fuelled, can be employed to ensure the aircraft refueling autonomy.

The proposed algorithm for the auto-throttle signal generating can be considered hereafter as an element of ensuring automated aerial refueling of the aircraft.

**Keywords:** aerial refueling, automated aerial refueling, auto-throttle, fueling cone, flight refueling probe, speed control channel automation.

### References

1. Kurbesov V.D. *Trudy LII*, 1976, no. 299, pp. 1–27.
2. Cheglakov D.I. *Novyi Universitet. Seriya Tekhnicheskie naukiyu*, 2011, no. 4, pp. 34–47.
3. Marbashev K.Kh., Ivanov Yu.L., Maranov A.Ya., Chernov L.G. *Patent RU 45837 U1*, 27.07.1999.
4. Orlov S.V., Cheglakov D.I. *Materialy I Nauchno-prakticheskoi konferentsii "Innovatsii v Aviastroenii"*, 2010, pp. 130–142.
5. Yaroshevskii V.A. *Uchenye zapiski TsAGI*, 2003, vol. XXXIV, no. 3–4, pp. 91–108.
6. Poedinok V.M. *Uchenye zapiski TsAGI*, 2005, vol. XXXVI, no. 1–2, pp. 95–102.
7. Poedinok V.M. *Uchenye zapiski TsAGI*, 2010, vol. XLI, no. 6, pp. 54–61.

8. Poedinok V.M. *Uchenye zapiski TsAGI*, 2012, vol. XLIII, no. 1, pp. 97–110.
9. Babkin V.I., Belotserkovskii A.S., Turchak L.I. *Sistemy obespecheniya vikhrevoi bezopasnosti poletom letatel'nykh apparatov* (Systems for vortex safety ensuring of aircraft flight), Moscow, Nauka, 2008, 372 p.
10. Tikhonov V.N., Korsun O.N., Bondarevskaya L.E. *Problemy bezopasnosti poletov*, 2009, no. 3, pp. 47–57.
11. Obolenskii Yu.G., Pokhvalenskii V.L., Cheglakov D.I. *Trudy MAI*, 2013, no. 65. URL: <http://trudymai.ru/eng/published.php?ID=35966>
12. Vyshinskii V.V. *Aeromekhanika i gazovaya dinamika*, 2003, no. 4, pp. 23–31.
13. Animitsa O.V., Sviridenko Yu.N. *Trudy TsAGI*. No. 2717, Moscow, Izdatel'skii otdel TsAGI, 2012, pp. 3–13.
14. Animitsa O.V., Gaifullin A.M., Ryzhov A.A., Sviridenko Yu.N. *Trudy MFTI*, 2015, vol. 7, no. 1(25), pp. 3–15.
15. Cheglakov D.I. *Nauka i obrazovanie: Nauchnoe izdanie MGTU im. N.E. Baumana*, 2013, no. 1, pp. 235–244. URL: <http://technomag.edu.ru/doc/500331.html>
16. Orlov S.V., Cheglakov D.I. *Materialy II Mezhotraslevogo molodezhnogo nauchno-tekhnicheskogo foruma "Molodezh' i budushchee aviatsii i kosmonavтики – 2010"*, St. Petersburg, Print-salon, 2011, p. 62.
17. Zaichik L.E., Desyatnik P.A., Zhelonkin V.I., Zhelonkin M.V., Tkachenko O.I., Yashin Yu.P. Mobility effect of flight simulator cabin on aircraft in-flight refueling problem modeling. *Aerospace MAI Journal*, 2017, vol. 24, no. 2, pp. 86–94.
18. Matveyev A.V., Bobronnikov V.T. A technique for aircraft control system design using MATLAB/Simulink software. *Aerospace MAI Journal*, 2009, vol. 16, no. 4, pp. 53–61.
19. Isaev V.K., Zolotukhin V.V. Some problems of 2D-maneuvering to ensure the vortex safety of an aircraft. *Aerospace MAI Journal*, 2009, vol. 16, no. 7, pp. 5–10.
20. Tyaglik M.S., Efremov A.V., Tishchenko A.N., Tyaglik A.S. *Svidetel'stvo o gosudarstvennoi registratsii programmy dlya EVM RU 2019660061*, 30.07.2019.
21. Zhuravskii K.A., Vereshchikov D.V., Makarenko V.N. *Materialy XVIII Vserossiiskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii "Innovatsionnye tekhnologii v obrazovatel'nom protsesse"*, 2016, pp. 90–94.
22. Korepanov S.E. *Vestnik RGRTU*, 2016, no. 56, pp. 114–123.
23. Korepanov S.E. *Algoritmy obnaruzheniya ob'ektov i otsenivaniya ikh traektornykh parametrov s ispol'zovaniem kanala tekhnicheskogo zreniya bortovykh sistem obrabotki informatsii i upravleniya* (Algorithms for objects detecting and their trajectory parameters evaluating using technical vision channel of on-board information processing and control systems). Abstract of doctor's thesis, Ryazan, Ryazanskii gosudarstvennyi radiotekhnicheskii universitet, 2016, 22 p.
24. Hanlon M. *World's first hand-off autonomous air refueling engagement*, 2006. URL: <http://www.gizmag.co.uk/6144>