

УДК 62-503.57

doi: 10.18698/0536-1044-2019-9-20-25

Системы автоматического регулирования давления в герметических кабинах самолетов

Ж.С. Сухов, Г.А. Тимофеев

МГТУ им. Н.Э. Баумана

Automatic Aircraft Cabin Pressurization Systems

Z.S. Sukhov, G.A. Timofeev

Bauman Moscow State Technical University

Дан обзор пневматических, электропневматических и цифровых систем автоматического регулирования давления в герметической кабине самолета. Указаны модели воздушных судов, на которые установлены такие системы. Проанализированы перспективные алгоритмы регулирования давления воздуха в герметической кабине летательного аппарата, и исследованы работы по этой теме. Рассмотрена работа российского автора, где использовано оптимальное управление по принципу максимума Понтрягина. Исследованы работы зарубежных ученых, применяющих нечеткий ПИД-регулятор, L1-адаптивный контроллер, а также другие методы адаптивного регулирования давления в герметической кабине самолета. Приведены краткие результаты этих работ. Выполненный анализ свидетельствует о необходимости использования новых методов и подходов к построению систем автоматического регулирования давления для воздушных судов разного типа. Одним из самых перспективных решений является применение адаптивных регуляторов. Показана актуальность разработки виртуальной среды тестирования для сокращения затрат на натурные испытания.

Ключевые слова: системы регулирования давления, адаптивные регуляторы, выпускной клапан, герметическая кабина самолета, нечеткий ПИД-регулятор, оптимальное управление

This article presents a review of pneumatic, electro-pneumatic and digital systems for automatic pressure control in an airtight cabin and lists the types of aircraft where such systems are installed. Advanced algorithms for controlling the pressure in an airtight cabin are analyzed and literature on this topic is surveyed. The work of a Russian author that describes optimal control based on Pontryagin's maximum principle is examined. The works of foreign authors on fuzzy PID-controller, L1-adaptive controller and other methods of adaptive pressurization are analyzed and brief results of these works are presented. The performed analysis indicates the need to use new methods and approaches to the synthesis of automatic pressure control systems for various types of aircraft. One of the most promising solutions is the use of adaptive regulators. The relevance of developing a virtual testing environment to reduce the cost of full-scale testing is shown.

Keywords: pressurization systems, adaptive controllers, bleed valve, airtight cabin, fuzzy PID-controller, optimal control

Основным назначением герметических кабин (ГК) пассажирских самолетов является обеспечение жизненных условий для пассажиров и членов летного экипажа в высотных полетах. Это достигается прежде всего поддержанием

необходимого для нормальной жизнедеятельности человека давления воздуха [1].

Процесс создания в ГК избыточного давления воздуха называют наддувом кабины. В современных пассажирских самолетах наддув

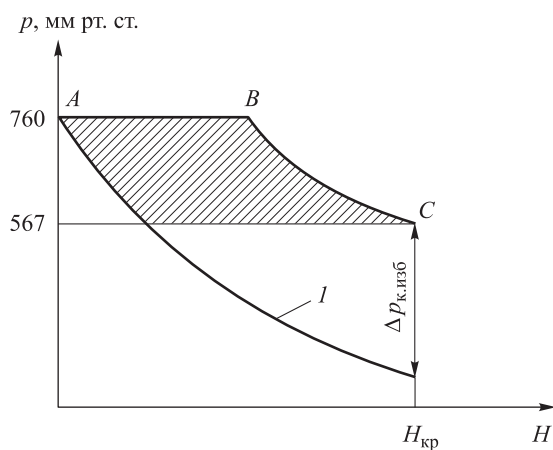
осуществляется с помощью воздушных компрессоров авиадвигателей или специальных кабинных нагнетателей. Наддув повышает давление в ГК, поддерживаемое изменением количества выпускаемого из кабины воздуха системой автоматического регулирования давления (САРД).

Согласно нормам летной годности [2], минимальное абсолютное давление воздуха в ГК при нормальных эксплуатационных условиях должно быть не ниже 567 мм рт. ст. (75,6 кПа, что эквивалентно высоте полета летательного аппарата $H \leq 2400$ м), а установившаяся скорость изменения давления в кабине — не более 0,18 мм рт. ст./с (24 Па/с). Также установлено, что при любом отказе или неисправности САРД в ГК самолета должно поддерживаться давление, эквивалентное высоте $H \leq 4500$ м, т. е. равное примерно 432 мм рт. ст. (57,6 кПа) [2].

Отдельно следует отметить требования, предъявляемые к тактико-техническим характеристикам зарубежных и перспективных российских воздушных судов (ВС). В настоящее время разработчики ВС активно внедряют принцип сверхманевренности, расширяющий диапазон высот и скоростей полета ВС, обосновывают выход крейсерской скорости на сверхзвуковые. В связи с этим ожидается значительное увеличение скорости изменения давления воздуха в ГК при интенсивном маневрировании в вертикальной плоскости [3].

Таким образом, повышение точности регулирования давления воздуха в ГК ВС становится актуальной задачей.

Цель работы — исследование существующих систем регулирования давления для разработки новой методики синтеза САРД.



Графическая иллюстрация закона изменения давления в ГК

Обзор САРД. У большинства современных пассажирских самолетов закон изменения давления p в ГК соответствует зависимости $p = f(H)$, проиллюстрированной на рисунке. Этот закон имеет зону постоянного абсолютного давления AB и зону постоянного избыточного давления BC , т. е. расстояние по вертикали между кривой BC и кривой I , представляющей собой международную стандартную атмосферу, постоянно и равно избыточному давлению в ГК $\Delta p_{к.изб.}$.

Согласно нормам летной годности, на высоте крейсерского полета $H_{кр}$ давление в ГК должно быть не ниже 567 мм рт. ст., а следовательно,

$$\Delta p_{к.изб.} = 567 - p_{H_{кр.}}$$

Рост избыточного давления в ГК приводит к упрочнению и утяжелению фюзеляжа. Абсолютное давление поддерживается до определенной высоты полета. С ее возрастанием повышается опасность декомпрессионных расстройств в организме человека (особенно в случае аварийной разгерметизации) и увеличивается масса конструкции. На рисунке область допустимого изменения давления заштрихована.

Рассмотрим системы автоматического регулирования давления в ГК самолета, оснащенные пневматическими, электропневматическими и цифровыми регуляторами.

Пневматические САРД. Основными элементами таких систем являются командные приборы и выпускные клапаны, связанные между собой пневматической линией. Обычно осуществляется резервирование командных приборов. Количество выпускных клапанов определяется объемом ГК, количеством подаваемого воздуха и другими факторами.

Работа регулятора заключается в формировании пневматического управляющего сигнала от кабины и атмосферы. Закон управления включает в себя три основных этапа, зависящих от высоты полета ВС. Первый этап соответствует работе регулятора в наземных условиях с использованием вакуумных насосов (что увеличивает общую массу и снижает общую надежность системы), второй — полету ВС на высотах от 0 до 5...7 км, третий — полету ВС на высотах, превышающих 5...7 км [1]. Пневматическими системами оснащены самолеты Ту-154, Ил-62 и Ил-76.

Электропневматические САРД. Эти системы представляют собой улучшенную версию пневматических САРД, оснащенных электрически-

ми блоками. Их создание, связанное с необходимостью уменьшения массы и размера систем жизнеобеспечения, также повысило полезную нагрузку ВС [4]. Такими системами оборудованы самолеты Ил-86, Як-42 и Ил-96.

Цифровые САРД. Расширение диапазона высот и скоростей полета ВС потребовало более точного регулирования давления воздуха в ГК. При цифровом управлении аналоговые автоматические регуляторы заменяют цифровыми. В качестве органа управления применяют выпускные клапаны с электроприводом. Использование цифровой техники для управления САРД позволяет значительно упростить схемотехнические решения построения системы регулирования, увеличить ее гибкость, надежность и глубину диагностирования отказов [5]. Также значительно упрощается дублирование контура управления для повышения надежности САРД.

Преимуществом цифровых систем перед аналоговыми является простота подстройки параметров регулирования, а также возможность применения более сложных законов управления, что соответствует непростым задачам, возлагаемым на современные САРД воздушных суперлайнеров и сверхманевренных летательных аппаратов. Цифровыми системами оснащены самолеты АН-70 и Ил-112.

Вследствие расширения диапазона высот и скоростей полета современных и перспективных ВС, а также ужесточения требований к массогабаритным характеристикам САРД происходит постепенное вытеснение традиционных пневматических и электропневматических систем цифровыми. Использование последних позволяет заменить множество аналоговых автоматических регуляторов одним цифровым блоком.

Однако большое количество регулирований, выполняемых классическим ПИД-регулятором, негативно сказывается на долговечности органов управления. В связи с этим возникает потребность в новых алгоритмах поддержания давления в ГК самолета для цифровых систем, способных при малом количестве регулирований обеспечить высокую точность этого процесса.

Обзор перспективных алгоритмов регулирования давления. В области применения перспективных алгоритмов регулирования давления исследования только начинаются. В настоящее время большая часть научных изысканий направлена на повышение надежности функ-

ционирования САРД, в то время как точности поддержания давления воздуха в ГК ВС при интенсивном маневрировании не уделено должного внимания. Рассмотрим несколько публикаций, посвященных этой теме.

Оптимальное управление по принципу максимума Понтрягина. В работе [3] для поддержания требуемого давления воздуха и скорости его изменения в ГК ВС предложен способ оптимизации регулирования давления, основанный на прогнозировании его изменения. Этот способ базируется на теории оптимального управления, в частности на принципе максимума Понтрягина.

В результате данной работы получен более точный способ регулирования давления воздуха в ГК, позволяющий упреждающе изменять этот параметр.

Нечеткий ПИД-регулятор. В работах [6, 7] для повышения точности регулирования давления использована нечеткая логика в комбинации с классическим ПИД-регулятором. Нечеткий ПИД-регулятор разработан с учетом нелинейных характеристик модели САРД. На каждом шаге регулирования давления воздуха параметры ПИД-регулятора уточняются для улучшения качества этого процесса.

Результатами этих работ стали синтез нечеткого ПИД-регулятора и симуляция в среде MATLAB, для выполнения которой применена классическая модель ГК самолета. Проведены симуляции стандартного профиля полета ВС: взлета, полета и посадки. Симуляция показала, что нечеткий ПИД-регулятор по сравнению с классическим имеет более высокую точность регулирования давления.

L1-адаптивный контроллер. В работах [8–12] приведен алгоритм адаптивного контроллера, основанного на L1-архитектуре, для нелинейного выпускного клапана самолета. В модель ГК добавлены эффект неизвестных возмущений и гистерезис, возникающий из-за люфта и сухого трения. Такие нелинейности вызывают колебания, что негативно сказывается на сроке эксплуатации изделия. Результаты моделирования показали преимущества L1-контроллера в системах с высокой нелинейностью перед линейными контроллерами, не способными сгладить такие негативные особенности, как гистерезис и влияние входящего потока давления на выпускной клапан.

Таким образом, использование адаптивного контроллера с L1-архитектурой позволяет уве-

личить срок эксплуатации механических систем путем смягчения нелинейной динамики, которая иначе давала бы большую нагрузку на аккумуляторы. Кроме того, такой адаптивный контроллер точнее отслеживает желаемое положение выпускного клапана.

Обзор указанных публикаций и других работ [13–18] показал, что исследования в данном направлении ведутся. Предлагаются разные подходы для повышения точности регулирования давления в ГК. Адаптивные системы управления превосходят классические (классический ПИД-регулятор, импульсный регулятор), так как они способны учитывать нелинейность САРД в целом.

Однако такие системы значительно более сложны для разработки и синтеза, а их надежность в критических ситуациях неизвестна. Кроме того, отсутствует единая методика разработки адаптивных систем регулирования давления для различных ВС. В связи с этим требуются допол-

нительные исследования при высоких динамических изменениях параметров САРД.

Выводы

1. Для соответствия авиационным правилам АП-25 [2] в перспективных ВС необходимо использовать новые подходы к построению САРД. Одним из наиболее перспективных направлений решения этой задачи является применение адаптивных алгоритмов.

2. В настоящее время не существует единой методики построения адаптивных алгоритмов для регулирования давления в ГК ВС. В связи с этим поставлена задача разработки методики синтеза систем адаптивного автоматического регулирования давления для различных типов ВС, а также разработки виртуальной среды тестирования с целью сокращения затрат на натурные испытания.

Литература

- [1] Гришанов Н.Г. *Высотное оборудование самолетов гражданской авиации*. Москва, Транспорт, 1971. 264 с.
- [2] *Авиационные правила. Ч. 25. Нормы летной годности самолетов транспортной категории (АП-25)*. Межгосударственный авиационный комитет, 2009. 266 с.
- [3] Кучевский С.В., Гервальд А.В., Онуфриенко В.В., Титов Ю.П. Способ оптимизации регулирования давления воздуха в герметической кабине воздушного судна. *Труды МАИ*, 2017, вып. 92. URL: <https://readera.ru/14327880> (дата обращения 10 мая 2019).
- [4] Матвеев А.М., Бекасов В.И., ред. *Системы оборудования летательных аппаратов*. Москва, Машиностроение, 2005. 550 с.
- [5] Щербаков А.В. *Автоматическое регулирование авиационных систем кондиционирования воздуха*. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2010. 290 с.
- [6] Wang Y. Simulation of aircraft cabin pressure control based on fuzzy-PID. *IET Conference Publications*, 2012, vol. 2012, iss. 598 CP, pp. 1846–1849, doi: 10.1049/cp.2012.1351
- [7] Ismail M.M. Adaptation of PID Controller using AI Techniques for Speed Control of Isolated Steam Turbine. *International Journal of Control, Automation and Systems*, 2012, vol. 1, no. 1, pp. 545–553, doi: 10.1109/JEC-ECC.2012.6186962
- [8] Cooper J., Cao C., Tang J. L1 adaptive control for aircraft air management system pressure-regulating bleed valve. *Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control, Transactions of the ASME*, 2017, vol. 139, iss. 12, no. art. 121005, doi: 10.1115/1.4036949
- [9] Liu N., Cai Z., Wang Y. Applications of L1 adaptive control in aircraft attitude and velocity control. *2016 IEEE Chinese Guidance, Navigation and Control Conference*, 2017, no. art. 7828923, pp. 1002–1007, doi: 10.1109/CGNCC.2016.7828923
- [10] Shang L., Liu G. Optimal Control of a Bleed Air Temperature Regulation System. *Proceedings of the 2007 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation*, 2007, no. art. 4303968, pp. 2610–2615, doi: 10.1109/ICMA.2007.4303968
- [11] Hodal P., Liu G. Bleed Air Temperature Regulation System: Modeling, Control, and Simulation. *IEEE Conference on Control Applications (CCA)*, Toronto, ON, Canada, 28–31 August 2005, pp. 1003–1008.

- [12] Cooper J., Cao C. L1 Adaptive Controller with Additional Uncertainty Bias Estimation. *25th Chinese Control and Decision Conference (CCDC)*, Guiyang, China, 25–27 May 2013, pp. 607–611, doi: 10.1109/CCDC.2013.6560996
- [13] Esfandiari K., Abdollahi F., Talebi H.A. Adaptive control of uncertain nonaffine nonlinear systems with input saturation using neural networks. *Journal of Aerospace Engineering*, 2014, vol. 27, iss. 3, pp. 2311–2322, doi: 10.1109/TNNLS.2014.2378991
- [14] Pérez-Grande I., Leo T.J. Optimization of a commercial aircraft environmental control system. *Applied Thermal Engineering*, 2002, vol. 22, pp. 1885–1904, doi: 10.1016/S1359-4311(02)00130-8
- [15] Feliot P., Le Guennec Y., Bect J., Vazquez E. Design of a commercial aircraft environment control system using Bayesian optimization techniques. *EngOpt 2016, 5th International Conference on Engineering Optimization*, Iguassu Falls, Brazil, 19–23 June 2016, pp. 1–10.
- [16] Yanlei L., Lunjun C., Haidong Y., Zhenglong Z., Junwei C. Research on the Fuzzy Sliding-Mode Control for the Electro-Pneumatic Proportional System. *6th International Conference on Fuzzy Systems and Knowledge Discovery*, 2009, vol. 4, no. art. 5359120, pp. 156–159, doi: 10.1109/FSKD.2009.346
- [17] Andrikopoulos G., Nikolakopoulos G., Manesis S. Adaptive internal control scheme for pneumatic artificial muscle. *European Control Conference*, 2013, no. art. 6669421, pp. 772–777.
- [18] Gong Q. Control of pneumatic servo system based on neural network PID algorithm. *Applied Mechanics and Materials*, 2014, vol. 457–458, pp. 1344–1347, doi: 10.4028/www.scientific.net/AMM.457-458.1344

References

- [1] Grishanov N.G. *Vysotnoye oborudovaniye samoletov grazhdanskoy aviatsii* [High-altitude equipment for civil aircraft]. Moscow, Transport publ., 1971. 264 s.
- [2] *Aviatsionnyye pravila. Ch. 25. Normy letnoy godnosti samoletov transportnoy kategorii (AP-25)* [Aviation Rules. Part 25. Airworthiness standards for transport category aircraft (AP-25)]. Mezhgosudarstvennyy aviatsionnyy komitet publ., 2009. 266 p.
- [3] Kuchevskiy S.V., Gerval'd A.V., Onufriyenko V.V., Titov Yu.P. Air pressure in aircraft pressurized cabin control optimizing method. *Trudy MAI*, 2017, iss. 92 (in Russ.). Available at: <https://readera.ru/14327880> (accessed 10 May 2019).
- [4] *Sistemy oborudovaniya letatel'nykh apparatov* [Aircraft Equipment Systems]. Ed. Matveyenko A.M., Bekasov V.I. Moscow, Mashinostroyeniye publ., 2005. 550 p.
- [5] Shcherbakov A.V. *Avtomaticheskoe regulirovaniye aviatcionnykh system conditionirovaniya vosduha* [Automatic regulation of aviation air conditioning systems]. Moscow, Bauman Press, 2010. 290 p.
- [6] Wang Y. Simulation of aircraft cabin pressure control based on fuzzy-PID. *IET Conference Publications*, 2012, vol. 2012, iss. 598 CP, pp. 1846–1849, doi: 10.1049/cp.2012.1351
- [7] Ismail M.M. Adaptation of PID Controller using AI Techniques for Speed Control of Isolated Steam Turbine. *International Journal of Control, Automation and Systems*, 2012, vol. 1, no. 1, pp. 545–553, doi: 10.1109/JEC-ECC.2012.6186962
- [8] Cooper J., Cao C., Tang J. L1 adaptive control for aircraft air management system pressure-regulating bleed valve. *Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control, Transactions of the ASME*, 2017, vol. 139, iss. 12, no. art. 121005, doi: 10.1115/1.4036949
- [9] Liu N., Cai Z., Wang Y. Applications of L1 adaptive control in aircraft attitude and velocity control. *2016 IEEE Chinese Guidance, Navigation and Control Conference*, 2017, no. art. 7828923, pp. 1002–1007, doi: 10.1109/CGNCC.2016.7828923
- [10] Shang L., Liu G. Optimal Control of a Bleed Air Temperature Regulation System. *Proceedings of the 2007 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation*, 2007, no. art. 4303968, pp. 2610–2615, doi: 10.1109/ICMA.2007.4303968
- [11] Hodal P., Liu G. Bleed Air Temperature Regulation System: Modeling, Control, and Simulation. *IEEE Conference on Control Applications (CCA)*, Toronto, ON, Canada, 28–31 August 2005, pp. 1003–1008.

- [12] Cooper J., Cao C. L1 Adaptive Controller with Additional Uncertainty Bias Estimation. 25th Chinese Control and Decision Conference (CCDC), Guiyang, China, 25–27 May 2013, pp. 607–611, doi: 10.1109/CCDC.2013.6560996
- [13] Esfandiari K., Abdollahi F., Talebi H.A. *Journal of Aerospace Engineering*, 2014, vol. 27, iss. 3, pp. 2311–2322, doi: 10.1109/TNNLS.2014.2378991
- [14] Pérez-Grande I., Leo T.J. Optimization of a commercial aircraft environmental control system. *Applied Thermal Engineering*, 2002, vol. 22, pp. 1885–1904, doi: 10.1016/S1359-4311(02)00130-8
- [15] Feliot P., Le Guennec Y., Bect J., Vazquez E. Design of a commercial aircraft environment control system using Bayesian optimization techniques. *EngOpt 2016, 5th International Conference on Engineering Optimization*, Iguassu Falls, Brazil, 19–23 June 2016, pp. 1–10.
- [16] Yanlei L., Lunjun C., Haidong Y., Zhenglong Z., Junwei C. Research on the Fuzzy Sliding-Mode Control for the Electro-Pneumatic Proportional System. 6th International Conference on Fuzzy Systems and Knowledge Discovery, 2009, vol. 4, no. art. 5359120, pp. 156–159, doi: 10.1109/FSKD.2009.346
- [17] Andrikopoulos G., Nikolakopoulos G., Manesis S. Adaptive internal control scheme for pneumatic artificial muscle. *European Control Conference*, 2013, no. art. 6669421, pp. 772–777.
- [18] Gong Q. Control of pneumatic servo system based on neural network PID algorithm. *Applied Mechanics and Materials*, 2014, vol. 457–458, pp. 1344–1347, doi: 10.4028/www.scientific.net/AMM.457-458.1344

Статья поступила в редакцию 07.06.2019

Информация об авторах

СУХОВ Ждан Сергеевич — аспирант кафедры «Теория механизмов и машин». МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1, e-mail: gdan.94@mail.ru).

ТИМОФЕЕВ Геннадий Алексеевич — доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Теория механизмов и машин». МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1, e-mail: timga@bmstu.ru).

Information about the authors

SUKHOV Zhdan Sergeevich — Postgraduate, Theory of Mechanisms and Machines Department. Bauman Moscow State Technical University (105005, Moscow, Russian Federation, 2nd Baumanskaya St., Bldg. 5, Block 1, e-mail: gdan.94@mail.ru).

TIMOFEEV Gennadiy Alekseevich — Doctor of Science (Eng.), Professor, Head of Theory of Mechanisms and Machines Department. Bauman Moscow State Technical University (105005, Moscow, Russian Federation, 2nd Baumanskaya St., Bldg. 5, Block 1, e-mail: timga@bmstu.ru).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Сухов Ж.С., Тимофеев Г.А. Системы автоматического регулирования давления в герметических кабинах самолетов. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2019, № 9, с. 20–25, doi: 10.18698/0536-1044-2019-9-20-25

Please cite this article in English as:

Sukhov Z.S., Timofeev G.A. Automatic Aircraft Cabin Pressurization Systems. *Proceedings of Higher Educational Institutions. Machine Building*, 2019, no. 9, pp. 20–25, doi: 10.18698/0536-1044-2019-9-20-25