

Соколов Олег Аркадьевич

Санкт-Петербургский государственный университет гражданской авиации им. Главного
маршала авиации А.А. Новикова

Иванов Игорь Александрович

Санкт-Петербургский государственный университет гражданской авиации им. Главного
маршала авиации А.А. Новикова

Копылов Кирилл Сергеевич

Санкт-Петербургский государственный университет гражданской авиации им. Главного
маршала авиации А.А. Новикова

Экономическая оценка влияния настройки регулятора продольного канала САУ воздушного судна на эксплуатационные затраты авиакомпании

Аннотация. В работе предложен вариант настройки регулятора продольного канала системы автоматизированного управления (САУ – далее) влияющий не только на качество переходных процессов, но и на расход топлива, нагрузку на исполнительные приводы рулевых поверхностей и риск внеплановых работ. Отмечается, что повышение качества управления может сопровождаться ростом интенсивности управляющих воздействий и нагрузок на исполнительные механизмы, что приводит к дополнительным эксплуатационным затратам, поэтому выбор настроек целесообразно выполнять с учетом экономических критериев эксплуатации. Дополнительно рассмотрено использование воспроизводимой методики экономического выбора настроек ПИД-регулятора продольного канала на основе единого критерия, в котором технические показатели качества (перерегулирование, время установления, интегральная ошибка, энергетика управления, вариация управляющего сигнала) переводятся в экономические показатели: затраты на топливо, ускоренный износ исполнительных механизмов и потери от простоев. Экономическая эффективность внедрения алгоритма оптимизации и процедуры сопровождения настроек оценивается через чистую приведенную стоимость (NPV – далее) проекта в соответствии с общепринятыми подходами к оценке эффективности инвестиционных проектов.

Ключевые слова: экономическая оценка, эксплуатационные затраты, система автоматизированного управления, продольный канал, ПИД-регулятор, оптимизация, топливная эффективность, исполнительные приводы, простои воздушного судна, чистая приведенная стоимость.

Sokolov Oleg Arkadievich

St. Petersburg State University of Civil Aviation named after A.A. Novikov

Ivanov Igor Aleksandrovich

St. Petersburg State University of Civil Aviation named after A.A. Novikov

Kopilov Kirill Sergeevich

St. Petersburg State University of Civil Aviation named after A.A. Novikov

Economic Assessment of the Effect of Longitudinal Autopilot Controller Tuning on Airline Operating Costs

Abstract. The paper proposes a method for adjusting the longitudinal channel regulator of the automated control system (ACS), which affects not only the quality of transient processes, but also fuel consumption, the load on the steering surface actuators, and the risk of unscheduled maintenance. It is noted that improving the quality of control can lead to increased control inputs

and loads on the actuators, resulting in additional operational costs. Therefore, it is advisable to select the settings based on economic criteria. The paper considers the use of a reproducible methodology for selecting the economic settings of the longitudinal channel PID controller based on a single criterion, in which the technical quality indicators (overshoot, settling time, integral error, control energy, and variation of the control signal) are translated into economic indicators: fuel costs, accelerated wear of the actuators, and downtime losses. The economic efficiency of implementing the optimization algorithm and the settings maintenance procedure is evaluated using the net present value (NPV) of the project, in accordance with the generally accepted approaches to evaluating the efficiency of investment projects.

Keywords: economic assessment, operating costs, automated control system, longitudinal channel, PID controller, optimization, fuel efficiency, actuators, aircraft downtime, net present value.

ВВЕДЕНИЕ

Современные системы автоматизированного управления полетом относятся к наиболее важным и быстро развивающимся системам воздушных судов (ВС – далее). Они становятся комплексными, объединяют подсистемы и используют информацию множества датчиков, при этом задачи обеспечения точности управления и безопасности требуют применения эффективных методов анализа и синтеза [1]. САУ самолета включает автопилот и взаимосвязанные каналы (курс, крен, тангаж/высота), поэтому требования к качеству регулирования формируются одновременно по устойчивости, управляемости и эксплуатационным ограничениям [1-2]. В реальных условиях эксплуатации ВС повышение динамического качества и помехоустойчивости «любой ценой» приводит к росту управляющих воздействий, что увеличивает нагрузку на исполнительные механизмы, что в итоге отражается на экономике эксплуатации парка ВС.

Экономическая постановка задачи связана с тем, что простой ВС на земле по техническим причинам приводит к существенным прямым и косвенным финансовым потерям. Отдельно следует учитывать, что экономичность полета ВС существенно зависит от режимов по скорости и высоте: часовой и километровый расход топлива чувствительны к выбору режима, а улучшение экономических показателей эксплуатации двигателей и снижение расхода топлива характерны для полета на больших высотах при корректно выбранных режимах [9]. Следовательно, что удержание заданных режимов без избыточных колебаний и перерегулирования имеет прямую связь с топливной составляющей.

ПИД-регуляторы (регуляторы, формирующие управляющее воздействие как сумму пропорциональной, интегральной и дифференциальной составляющих по ошибке) остаются одним из самых распространенных типов регуляторов благодаря простоте и низкой стоимости, однако на практике остаются проблемы настройки в условиях шумов, нелинейностей и ограничений, включая вопросы насыщения и корректной фильтрации [3]. В авиационном применении дополнительно значимы ограничения по исполнительным механизмам рулевых поверхностей: по мере роста доли электрических и электромеханических решений возрастает ценность корректного управления нагрузками и тепловыми режимами приводов [5]. Поэтому требуется методика, которая связывает выбор настроек регулятора с экономическим эффектом на горизонте эксплуатации.

ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

Модель продольного канала регулятора

В рамках воспроизводимой методики используется линейная модель объекта управления (типовой подход для анализа САУ) [1]. Для дальнейшей оптимизации достаточно выбрать параметрическую модель объекта (например, аппроксимацию второго порядка с запаздыванием), которая идентифицируется по данным испытаний/лётной эксплуатации:

$$W_o(s) = \frac{K}{(T_1s+1)(T_2s+1)} e^{-ts} \quad (1)$$

ПИД-регулятор в операторной форме (с фильтрацией дифференцирующей части) зададим как:

$$W_r(s) = K_p + \frac{K_i}{s} + \frac{K_d s}{1+T_f s} \quad (2)$$

ПИД-регулирование широко распространено и имеет развитую методическую базу настройки, но при практической реализации требуется учитывать шумы, нелинейности и насыщение [3]. Для стартовой настройки может применяться метод Циглера–Никольса [4] с последующим уточнением по критерию качества/экономики.

Замкнутая система:

$$W_{cl}(s) = \frac{W_r(s)W_o(s)}{1+W_r(s)W_o(s)} \quad (3)$$

Показатели качества регулирования

Из переходного процесса $y(t)$ относительно задания $y_{ref}(t)$ вычисляются стандартные показатели:

1) перерегулирование:

$$M_p = \frac{y_{max} - y_{\infty}}{y_{\infty}} \cdot 100\% \quad (4)$$

2) время установления t_s по полосе $\pm\Delta\%$;

3) интегральная ошибка:

$$J_{IAE} = \int_0^T |e(t)| dt \quad e(t) = y_{ref}(t) - y(t) \quad (5)$$

4) «энергетика» управления:

$$J_u = \int_0^T u^2(t) dt \quad (6)$$

5) вариация управляющего воздействия:

$$J_{\dot{u}} = \int_0^T \left| \frac{du(t)}{dt} \right| dt \quad (7)$$

Экономическая составляющая проекта

Экономическая часть строится через разделение эксплуатационных затрат и затрат жизненного цикла ВС (например: топливо, техническое обслуживание и т.д.) [6]. Введем годовую наработку парка H_y (летные часы в год), горизонт расчета N лет и ставку дисконтирования r согласно подходам оценки эффективности инвестиций [8].

Экономия топлива

Известно, что расход топлива зависит от режима по скорости и высоте. Режимы дальности/продолжительности и чувствительность часового расхода к скорости рассматриваются в учебных материалах по летной эксплуатации и аэродинамике и динамике полета [2]. Практически, отклонения от оптимального режима и лишние колебания по тангажу/скорости ведут к росту потребной тяги и, следовательно, расхода топлива. В модели это учитывается через коэффициент пересчета:

$$\Delta C_{fuel,y}(K_p, K_i, K_d) = c_{fuel} \cdot H_y \cdot \Phi_{fuel}(J_u) \quad (8)$$

где c_{fuel} – это стоимость топлива в расчете на единицу расхода (вводится пользователем по данным эксплуатанта), $\Phi_{fuel}(\cdot)$ – это функция связи интегральной энергетики управления и перерасхода топлива (задается и калибруется по данным).

Затраты на техническое обслуживание

Работа привода рулевой поверхности определяется командными сигналами и нагрузками, при этом выбор типа привода и его эксплуатационные ограничения описываются в инженерной литературе [5]. В расчете используем косвенный показатель интенсивности управления, отражающий частоту и скорость изменения управляющего воздействия и применяемый как приближенная характеристика динамической нагруженности исполнительного контура $J_{\dot{u}}$:

$$\Delta C_{act,y}(K_p, K_i, K_d) = c_{act} \cdot H_y \cdot \Phi_{act}(J_{\dot{u}}) \quad (9)$$

где c_{act} – это удельная стоимость ресурса (ремонта) привода, $\Phi_{act}(\cdot)$ – калибруемая функция.

Потери от простоев (внеплановые события)

События простоя ВС на земле по техническим причинам очевидно приводят к финансовым потерям, величина которых в отраслевой практике может быть очень значительной [6]. В модель вводится ожидаемая стоимость потерь:

$$C_{downtime,y} = \lambda_y \cdot t_{down} \cdot c_{down} \quad (10)$$

где λ_y – ожидаемое число внеплановых событий в год, t_{down} – средняя длительность простоя на событие, c_{down} – стоимость часа простоя (вводится пользователем (эксплуатантом) по данным эксплуатанта [6]).

Ключевой момент методики - улучшение динамики управления ВС (например, снижение перерегулирования и колебательности) уменьшает вероятность части событий, связанных с повышенной нагрузкой на привод/систему:

$$\lambda_y(K_p, K_i, K_d) = \lambda_0 \cdot (1 - \alpha \cdot \Psi(M_p, t_s, J_{\dot{u}})) \quad (11)$$

Здесь λ_y – ожидаемая интенсивность внеплановых событий обслуживания (событий в год) для узлов, связанных с продольным каналом САУ. λ_0 определяется по статистике технической службы за базовый период эксплуатации (например, число внеплановых работ на самолет в год по записям ТОиР). Показатели M_p , t_s и $J_{\dot{u}}$ вычисляются по данным моделирования замкнутой системы и при наличии по данным полетной регистрации. M_p и t_s характеризуют качество переходного процесса, а $J_{\dot{u}}$ – интенсивность изменения управляющего воздействия, отражающую режим работы исполнительного механизма. Функция $\Psi(\cdot)$ задается как нормированная оценка качества [0;1] и калибруется по данным эксплуатанта. Коэффициент α подбирается по историческим данным как чувствительность частоты событий к изменению метрик качества. Полученная λ_y далее используется в экономической части для расчета ожидаемых затрат на внеплановое обслуживание и простои по формулам денежного потока.

Денежные потоки и чистая приведенная стоимость

Годовой эффект (экономия со знаком «плюс») зададим как разность базового сценария и оптимизированного:

$$CF_y = (C_{fuel,y}^{base} - C_{fuel,y}^{opt}) + (C_{act,y}^{base} - C_{act,y}^{opt}) + (C_{downtime,y}^{base} - C_{downtime,y}^{opt}) - C_{opex,y} \quad (12)$$

где $C_{opex,y}$ – дополнительные операционные затраты на сопровождение процедуры оптимизации (работа инженеров, техников производственно-технического отдела, обновления ПО, расчеты).

Чистая приведенная стоимость проекта на горизонте N лет вычисляется по стандартному определению с дисконтированием:

$$NPV = -I_0 + \sum_{y=1}^N \frac{CF_y}{(1+r)^y} \quad (13)$$

где I_0 – единовременные затраты на внедрение (разработка расчетного инструмента, интеграция в инженерный процесс, валидация).

Моделирование

Исходные параметры парка ВС, экономические допущения (ставка дисконтирования, стоимость часа простоя, стоимость топлива), а также параметры модели продольного канала и ограничения по качеству регулирования приведены в табл. 1.

Таблица 1

Исходные данные для расчета и моделирования продольного канала САУ

Параметр	Обозначение	Ед. изм.	Значение
Число ВС в парке	n_{ac}	ед.	20
Горизонт расчета	H	лет	5

Ставка дисконтирования	r	доли ед.	0,12
Единовременные затраты на внедрение	I_0	руб	45 000 000
Ежегодные затраты сопровождения	$OPEX$	руб/год	6 000 000
Налет на 1 ВС в год	h	ч/год	2 800
Налет парка в год	$H_y = n_{ac} \cdot h$	ч/год	56 000
Средняя стоимость топлива	p_f	руб/кг	85
Средний расход топлива на парк (в год)	$G_{f,y}$	кг/год	37 650 000
Годовые затраты на топливо	$C_{fuel,y}$ $= p_f \cdot G_{f,y}$	руб/год	3 200 250 000
Базовая интенсивность внеплановых событий (на 1 ВС)	λ_0	1/год	0,90
Средняя длительность простоя на событие	τ_0	ч	18
Прямые материальные затраты на событие	c_0	руб/событие	1 200 000
Стоимость часа простоя ВС	p_{dow}	руб/ч	180 000
Снижение частоты событий после оптимизации	k_λ	доли ед.	0,15
Сокращение длительности работ/простоя	k_τ	доли ед.	0,10
Снижение прямых затрат на событие	k_c	доли ед.	0,08
Снижение топливных потерь (доля от $C_{fuel,y}$)	k_f	доли ед.	0,004
Коэффициент усиления объекта	K	—	1,0
Постоянная времени	T	с	2,5
Коэффициент демпфирования	ζ	—	0,70
Запаздывание (если учитываем)	L	с	0,20
Амплитуда ступенчатого задания	A	отн. ед.	1,0
Длительность моделирования	T_0	с	20
Шаг интегрирования	Δt	с	0,01
Допустимое перерегулирование	M_p^{max}	%	10
Допустимое время установления	t_s^{max}	с	8
Полоса установления	Δ	%	2

Результаты

Результаты моделирования замкнутой системы и расчетные показатели качества регулирования (включая M_p , t_s , интегральные критерии), а также соответствующие им годовые экономические эффекты и итоговый показатель эффективности для рассматриваемых вариантов настроек приведены в табл. 2.

Таблица 2

Результаты расчета показателей качества регулирования и экономических эффектов для вариантов настроек регулятора продольного канала САУ

Показатель	Базовая	Классическая	Экономически оптимальная
K_p	0,80	1,25	0,85
K_i	0,250	0,386	0,286
K_d	0,05	1,45	0,85
M_p , %	6,02	2,14	1,96
t_s , с	19,40	6,06	7,89
IAE	4,213	2,694	3,529
J_u	19,43	41,97	26,59
$J_{\dot{u}}$	274	69914	24376
ψ	0,000	0,814	1,000

k_λ	0,000	0,122	0,150
k_τ	0,000	0,081	0,100
k_c	0,000	0,065	0,080
k_f	0,0000	0,0033	0,0040
Экономия топлива, млн/год	0,00	10,42	12,80
Экономия ТО, млн/год	0,00	3,87	4,71
Экономия простоя, млн/год	0,00	11,29	13,71
CF , млн/год	0,00	19,58	25,22
NPV , млн	0,00	25,57	45,89

Базовая настройка модели (условно текущие настройки). Расчет выполнен моделированием замкнутой системы при фиксированных (K_p , K_i , K_d), значения M_p , t_s , IAE , J_u , $J_{\dot{u}}$ рассчитаны по переходному процессу. Экономический эффект принят нулевым как точка отсчета для сравнения вариантов.

Классическая настройка модели (вариант, ориентированный на улучшение динамики управления). Параметры (K_p , K_i , K_d) подбирались по результатам моделирования как минимизирующие интегральную ошибку (IAE) при выполнении ограничений по качеству $M_p \leq M_p^{max}$, $t_s \leq t_s^{max}$. После выбора настроек рассчитаны J_u , $J_{\dot{u}}$ и далее выполнен стоимостной расчет через ψ и коэффициенты эффекта.

Экономически оптимальная настройка. Вариант, полученный оптимизацией по стоимостному критерию; параметры (K_p , K_i , K_d) подбирались по результатам моделирования как минимизирующие суммарные приведенные затраты (эквивалентно максимизирующие NPV) при тех же ограничениях по M_p и t_s ; в критерий включены метрики интенсивности управления J_u , $J_{\dot{u}}$, после чего по выбранным настройкам рассчитаны годовые эффекты и NPV .

Классическая настройка дает лучшие показатели по точности регулирования: $IAE = 2,694$ против $3,529$ у экономически оптимальной, а также меньшее время установления $t_s = 6,06$ с против $7,89$ с. Однако это достигается ценой существенно более «жесткого» управления: $J_{\dot{u}}=69914$ против 24376 и $J_u=41,97$ против $26,59$. То есть система делает значительно более резкие и частые изменения управляющего воздействия, что в нашей постановке прямо ухудшает ресурсную и эксплуатационную составляющую (нагрузка на исполнительный контур, потенциальная трудоемкость обслуживания).

Экономически оптимальная настройка сохраняет приемлемое качество переходного процесса (перерегулирование $1,96\%$ и $t_s=7,89$ с), но одновременно снижает «агрессивность» управления по сравнению с классическим вариантом: $J_{\dot{u}}$ меньше примерно в $2,9$ раза ($69914/24376 \approx 2,87$), а J_u меньше примерно в $1,6$ раза ($41,97/26,59 \approx 1,58$). При этом итоговый годовой денежный эффект выше: $CF=25,22$ млн. руб./год против $19,58$ млн. руб./год, а NPV на горизонте 5 лет составляет $45,89$ млн. руб. против $25,57$ млн. руб. Разница по $NPV - 20,32$ млн. руб. в пользу экономически оптимальной настройки.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложена методика и расчетный инструмент (программа на языке программирования Python) для экономической оптимизации настроек ПИД-регулятора продольного канала САУ по критерию минимизации суммарных эксплуатационных затрат и максимизации чистой приведенной стоимости внедрения процедуры оптимизации.

Научная новизна работы.

1. Рассмотрен подход к экономической оценке настройки продольного канала САУ, при котором результаты расчета переходных процессов и показатели качества регулирования используются как исходные данные для расчета эксплуатационных затрат

авиакомпаний, включая топливную составляющую, затраты на обслуживание исполнительных механизмов и потери, связанные с простоями воздушного судна.

2. Предложен единый стоимостный критерий выбора настроек регулятора, в котором раздельно задаются и затем уточняются по данным эксплуатанта весовые коэффициенты для:

- а) потерь, обусловленных ошибкой регулирования;
- б) «интенсивности управления», отражающей нагрузку на исполнительные механизмы;
- в) штрафов за нарушение установленных ограничений по показателям качества (перерегулирование, время регулирования, устойчивость).

Это позволяет переходить от настройки «по динамике» к настройке по минимальным суммарным затратам при соблюдении требований к качеству управления.

3. Сформирована воспроизводимая расчетная процедура, объединяющая получение исходных настроек регулятора по стандартной методике [4], имитационное моделирование замкнутой системы, расчет показателей качества и их стоимостную интерпретацию с последующим вычислением годовых денежных потоков и чистой приведенной стоимости.

Список источников

1. Соколов О. А. Основы автоматизации управления на транспорте / О. А. Соколов, Д. О. Соколов. – Санкт-Петербург : Санкт-Петербургский государственный университет гражданской авиации, 2022. – 194 с. – ISBN 978-5-907354-24-1.

2. Коновалов Б. И. Теория автоматического управления / Б. И. Коновалов, Ю. М. Лебедев. – 4-е, стереотипное. – Санкт-Петербург : Издательство Лань, 2016. – 224 с. – ISBN 978-5-8114-1034-7.

3. Соколов О. А. Электроника в устройствах автоматики на транспорте / О. А. Соколов, П. С. Назаров, Д. О. Соколов. – Санкт-Петербург : Санкт-Петербургский государственный университет гражданской авиации, 2022. – 194 с. – ISBN 978-5-907354-26-5.

4. Вадутов О. С. Настройка типовых регуляторов по методу Циглера–Никольса : методические указания к выполнению лабораторной работы [Электронный ресурс]. — Томск : Издательство Томского политехнического университета, 2014. — 10 с.

5. Саяхов И. Ф. Электромеханические приводы для управления адаптивными крыльями летательных аппаратов / И. Ф. Саяхов, А. Н. Николаева // Электротехнические и информационные комплексы и системы. – 2017. – Т. 13, № 1. – С. 37-42.

6. Методика экономической оценки пассажирских самолетов : учебное пособие для студентов, обучающихся по программам высшего профессионального образования по специальности 160201 "Самолето- и вертолетостроение" / А. Д. Припадчев, Н. З. Султанов, Т. Н. Шаталова, О. А. Тихонова ; Оренбургский государственный университет. – Оренбург : Оренбургский государственный университет, 2009. – 126 с. – ISBN 978-5-7410-0876-8.

Сведения об авторах

Соколов Олег Аркадьевич, кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой №13 «Системы Автоматизированного Управления», Санкт-Петербургский государственный университет гражданской авиации имени Главного маршала авиации А. А. Новикова, Санкт-Петербург, Россия

Иванов Игорь Александрович, студент 3 курса, Санкт-Петербургский государственный университет гражданской авиации имени Главного маршала авиации А. А. Новикова, Санкт-Петербург, Россия.

Копылов Кирилл Сергеевич, студент 3 курса, Санкт-Петербургский государственный университет гражданской авиации имени Главного маршала авиации А.

А. Новикова, Санкт-Петербург, Россия.

Information about the authors

Sokolov Oleg Arkadyevich, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Head of Department No. 13 'Automated Control Systems', Saint Petersburg State University of Civil Aviation named after Chief Marshal of Aviation A. A. Novikov, Saint Petersburg, Russia

Ivanov Igor Aleksandrovich, 3rd year student, Saint Petersburg State University of Civil Aviation named after Chief Marshal of Aviation A. A. Novikov, Saint Petersburg, Russia.

Kopilov Kiril Sergeevich, 3rd year student, St. Petersburg State University of Civil Aviation named after Chief Marshal of Aviation A. A. Novikov, St. Petersburg, Russia.