
ОТРАСЛЕВЫЕ ПРОБЛЕМЫ

Оценка прямых эксплуатационных расходов для перспективных воздушных судов с альтернативными типами силовых установок

© 2024 г. И.В. Урюпин, А.О. Власенко

И.В. Урюпин,

Федеральный исследовательский центр «Информатика и управление» Российской академии наук, Москва; e-mail: uryupin93@yandex.ru

А.О. Власенко,

Общество с ограниченной ответственностью «Межотраслевой аналитический центр», Москва; e-mail: andrey.vlasenko84@gmail.com

Поступила в редакцию 06.06.2023

Аннотация. В настоящее время с учетом сложившейся геополитической ситуации одной из важных задач Российской Федерации является создание отечественных перспективных воздушных судов. Важным требованием при проектировании нового воздушного судна становится себестоимость его эксплуатации. В настоящей работе найдены новые регрессионные зависимости между мощностью / тягой силовой установки и ее стоимостью, уровнем расходов на техническое обслуживание и ремонт. Эти зависимости дают возможность рассматривать стоимость силовой установки и стоимость планера обособленно друг от друга. Это также позволит получить сравнимые между собой оценки себестоимости перевозки не только для существующих, но и гипотетических / перспективных самолетов следующих поколений с классическими газотурбинными двигателями и с гибридными и электрическими силовыми установками. В работе приведена методика оценки прямых эксплуатационных расходов для перспективных самолетов малой авиации. Расчет эксплуатационных расходов и структуры затрат демонстрируется на примере электрического самолета «Eviation Alice» и схожих с ним действующих функциональных аналогов, относящихся к самолетам малой авиации вместимостью 9–19 мест.

Ключевые слова: математическое моделирование, авиационная техника, эксплуатационные расходы, конкурентоспособность, малая авиация.

Классификация JEL: C51, L93, O32.

УДК: 338.45.

Для цитирования: **Урюпин И.В., Власенко А.О.** (2024). Оценка прямых эксплуатационных расходов для перспективных воздушных судов с альтернативными типами силовых установок // *Экономика и математические методы*. Т. 60. № 2. С. 92–104. DOI: 10.31857/S0424738824020087

ВВЕДЕНИЕ

Обеспечение авиатранспортной системы воздушными судами (ВС) является важным направлением социально-экономического развития любой страны. С учетом введенных в отношении Российской Федерации санкций на использование, приобретение и поддержание летной годности иностранных ВС в парке российских авиакомпаний, а также отсутствие в настоящее время самолета малой авиации (МА), целиком производимого в России, становится крайне актуальной задача создания перспективных отечественных самолетов.

Создание перспективного ВС — сложный, многоэтапный процесс, в котором ключевое место занимает задача определения требований (Власенко, Сухарев, Урюпин, 2023), предъявляемых к разрабатываемому самолету. При решении такой задачи активно используются модели оценки стоимости ВС (Fregnani, Mattos, Hernandez, 2019; Roy et al., 2019; Woehler et al., 2019). Снижение стоимости эксплуатации ВС позволяет повысить не только конкурентоспособность, но и увеличить спрос на авиаперевозки. Критерием, учитывающим основные затраты на эксплуатацию самолета, служат прямые эксплуатационные расходы (ПЭР), которые определяется как *себестоимость летного часа* (Опрышко Н., Опрышко Ю., Рубан, 2013) или *себестоимость кресло-километра* (Манвелидзе, 2018).

Одним из значимых факторов, влияющих на ПЭР, является развитие технологий авиастроения, позволяющих не только качественно повысить характеристики будущих ВС, но и снизить и перераспределить статьи расходов в структуре ПЭР. Наибольшее влияние на ПЭР может оказать разработка новых силовых установок (СУ). В настоящее время мировым научным сообществом все чаще рассматриваются концепты ВС с альтернативными СУ — гибридные (ГСУ), электрические (ЭСУ) и силовые установки на водородном топливе (Халютин, Давидов, Жмуров, 2017; Hoelzen et al., 2022). В перспективе применение таких СУ позволит снизить потребление топлива и увеличить потребность в электродвигателях и аккумуляторных батареях (АКБ), что отразится на стоимости эксплуатации ВС и в впоследствии может привести к снижению тарифов и росту объемов авиаперевозок. Таким образом, возникает задача оценки ПЭР для гипотетических / перспективных ВС с разными типами СУ. Решение исходной задачи потребует учитывать как прогнозные значения развития ключевых характеристик ВС, влияющих на себестоимость перевозки, так и сеть применения гражданской авиатехники.

Замена традиционной СУ на альтернативную не позволяют применять классические подходы оценки себестоимости (Кородюк, Гринев, 2019; Fioriti, Vercella, Viola, 2018), так как происходит существенное изменение характеристик ВС (в том числе и массовых). Это сказывается на уровне и структуре ПЭР (Finger et al., 2019).

В случае с ГСУ и ЭСУ затраты на топливо сокращаются или исключаются совсем, однако возникает необходимость учитывать расходы на электроэнергию и аккумуляторные батареи, что требует рассмотрения расходов СУ отдельно от ВС. В целом все подобные расходы могут быть отнесены к стандартным укрупненным статьям затрат, однако в рамках универсального подхода к оценке ПЭР отдельное рассмотрение планера и СУ должно проводиться для всех ВС с разными типами СУ, включая газотурбинные двигатели (ГТД). Таким образом, целью работы является создание универсальной методики оценки ПЭР для перспективных и существующих ВС МА, дающей сравнимые оценки для различных типов СУ, рассчитанные на области их применения.

Для разработки методики авторами получены новые регрессионные зависимости между мощностью / тягой силовой установки и ее стоимостью, уровнем расходов на техническое обслуживание и ремонт силовой установки. Найденные зависимости дают возможность рассматривать стоимости силовой установки и планера обособленно друг от друга, что унифицирует подход к оценке себестоимости как для существующих ВС, так и для гипотетических / перспективных самолетов следующих поколений с разными типами СУ. Расчет эксплуатационных расходов и структуры затрат демонстрируется на примере электрического самолета «Eviation Alice» и схожих с ним действующих функциональных аналогов, относящихся к самолетам МА вместимостью 9–19 мест.

1. ОЦЕНКА УРОВНЯ КОНКУРЕНТОСПОСОБНОСТИ ВОЗДУШНЫХ СУДОВ

Для оценки уровня конкурентоспособности перспективных самолетов МА предлагается методика, основанная на моделировании эксплуатации ВС на сети применения¹. В методике используются экономико-математические модели (Иванилов, Лотов, 1979; Ключков, Русанова, Максимовский, 2010; Washington et al., 2020), описывающие применение ВС для перевозки пассажиров, грузов и выполнения авиационных работ.

Входными параметрами модели являются технико-экономические характеристики сравниваемых ВС, участвующие в оценке конкурентоспособности, и характеристики сферы применения авиационной техники.

Методика содержит три основных этапа.

1. *Формирование списка сравниваемых ВС.* Конкурентная группа ВС, относящихся к одной сфере применения и имеющих сопоставимые функциональные возможности. Атрибутами служат летно-технические, технико-экономические характеристики ВС, а также характеристики двигателей.

2. *Определение сети (профиля) применения ВС.* Профиль применения описывается существующей или перспективной сетью применения или набором типовых рейсов, на основе статистических данных, экспертных оценок или прогнозов. Атрибутами служат аэропорты вылета и прилета, дальности и продолжительности полета, число рейсов, средние загрузки на рейсах, стоимости

¹ Сеть применения — выборка целевых линий применения воздушного судна, удовлетворяющая ограничениям по дальности и частоте выполняемых рейсов в год.

топлива/энергии в аэропортах сети; ставки сборов за аэронавигационное обслуживание на маршруте и в зоне аэропортов; тарифы и сборы за обслуживание в аэропортах сети.

3. *Оценка эффективности сравниваемых ВС.* В результате моделирования эксплуатации сравниваемых типов ВС на всех линиях сети применения определяются значения рейсовых затрат по каждой статье операционных расходов, суммарные расходы по линиям и удельные расходы.

Расчет интегральных показателей конкурентоспособности для сравниваемых типов ВС производится путем взвешивания показателей на каждой линии сети применения. Интегральными показателями расходов рассматриваются средние взвешенные значения удельных расходов в расчете на рейс и на кресло-километр (тонно-километр), соответствующие сети применения (средневзвешенному рейсу на сети применения ВС конкурентной группы).

2. РАСЧЕТ ПОКАЗАТЕЛЕЙ КОНКУРЕНТОСПОСОБНОСТИ ДЛЯ СРАВНИВАЕМЫХ ТИПОВ ВОЗДУШНЫХ СУДОВ

Суммарные расходы $C_i^{\text{рейс}}$ для модели i ВС на усредненный рейс определяются как сумма средних взвешенных на рейсе расходов по каждой статье k :

$$C_i^{\text{рейс}} = \sum_k \bar{C}_i^k = \bar{C}_i^{AP} + \bar{C}_i^{NAV} + \bar{C}_i^{F\&E} + \bar{C}_i^{Maint} + \bar{C}_i^{Lab} + \bar{C}_i^{Const},$$

где $\bar{C}_i^{AP}$ — среднее взвешенное значение суммарных рейсовых расходов в аэропорту; $\bar{C}_i^{NAV}$ — средние взвешенные рейсовые расходы на аэронавигационное обеспечение на маршруте; $\bar{C}_i^{F\&E}$ — средние взвешенные рейсовые расходы на горюче-смазочные материалы (авиаГСМ) и энергию на усредненный рейс; $\bar{C}_i^{Maint}$ — средние взвешенные рейсовые расходы на техническое обслуживание и ремонт (ТОиР); $\bar{C}_i^{Lab}$ — средние взвешенные расходы на оплату труда экипажей; $\bar{C}_i^{Const}$ — средние взвешенные расходы на владение, страховку и прочие постоянные расходы.

Поскольку транспортные возможности сравниваемых ВС могут отличаться от требований сети применения, при проведении моделирования необходимо скорректировать объем фактически перевозимой на модели ВС полезной нагрузки. Для этого могут быть использованы формулы:

$$n_{ij}^{pax} = n_j^{pax} PL_{ij}^{\text{рейс}} / PL_j, \quad W_{ij}^{\text{freight}} = W_j^{\text{freight}} PL_{ij}^{\text{рейс}} / PL_j, \quad (1)$$

$$\bar{n}_{i_{\text{рейс}}}^{pax} = \left(\sum_{j \in L} n_{ij}^{pax} N_j \right) / \sum_{j \in L} N_j, \quad \bar{W}_{i_{\text{рейс}}}^{\text{freight}} = \left(\sum_{j \in L} W_{ij}^{\text{freight}} N_j \right) / \sum_{j \in L} N_j, \quad (2)$$

$$PL_j = n_j^{pax} W + W_j^{\text{freight}}, \quad PL_{ij}^{\text{рейс}} = \min(PL_{ij}; PL_j),$$

где n_j^{pax} — среднее число пассажиров на рейс на линии j ; W — средний вес пассажира с багажом²; W_j^{freight} — средний вес груза на рейс на линии j ; $PL_{ij}^{\text{рейс}}$ — средняя масса полезной нагрузки на рейс, доступная для модели i на линии j ; PL_j — максимальная допустимая полезная нагрузка на рейс; n_{ij}^{pax} — среднее число пассажиров на рейс для модели i на линии j ; W_{ij}^{freight} — средний вес груза на рейс на линии j , доступный для перевозки моделью i ВС; $\bar{n}_{i_{\text{рейс}}}^{pax}$ — среднее число пассажиров на рейс для модели i ; $\bar{W}_{i_{\text{рейс}}}^{\text{freight}}$ — средний вес грузов и почты на рейс для модели i ВС; PL_j — средняя полезная нагрузка на рейс для сравниваемых типов ВС.

Максимальная допустимая полезная нагрузка PL_{ij} , если $l_j < l_{\text{max}L}$, определяется как

$$PL_{ij} = \max \left[0; \min \left[\frac{PL_i^{\text{maxFuel}} - PL_i^{\text{maxPL}}}{l_i^{\text{maxFuel}} - l_i^{\text{maxPL}}} (l_j - l_i^{\text{maxPL}}) + PL_i^{\text{maxPL}}; \frac{0 - PL_i^{\text{maxFuel}}}{l_i^{\text{maxL}} - l_i^{\text{maxFuel}}} (l_j - l_i^{\text{maxFuel}}) + PL_i^{\text{maxFuel}}; PL_i^{\text{maxPL}} \right] \right], \quad (3)$$

где PL_i^{maxFuel} — максимальная допустимая масса загрузки при максимальной заправке топливом; PL_i^{maxPL} — максимальная масса полезной нагрузки; l_i^{maxPL} — дальность полета с максимальной полезной нагрузкой; l_i^{maxFuel} — дальность полета с максимальной доступной полезной нагрузкой при максимальном запасе топлива; l_i^{maxL} — дальность полета с максимальным объемом топлива без полезной нагрузки (перегоночная дальность).

² В качестве среднего веса пассажира с багажом принимаются значения от 90 кг до 102 кг.

Средние аэропортовые расходы рассчитываются на базе взвешенных значений. Вес каждого аэропорта определяется пропорционально числу взлет-посадок ВС конкурентной группы на сети применения. Расходы в аэропорту складываются из расходов, зависящих от числа пассажиров и/или грузов, и фиксированных для типа ВС (т.е. не зависящих от загрузки). К фиксированным расходам относятся: сбор за взлет-посадку; обеспечение авиационной безопасности; аэронавигационное обеспечение в зоне аэропорта; обеспечение бортовым питанием, доставка пассажиров и экипажа; предоставление трапа; встреча—выпуск ВС; уборка и экипировка ВС; прочие расходы (если предусмотрено в аэропорту).

Итоговое значение средних расходов в аэропорту на рейс находится из формулы

$$\bar{C}_i^{AP} = \sum_k \frac{\sum_{j \in L} C_{jk}^{AP} n_{ij}^{pax} N_j}{\sum_{j \in L} N_j} + \frac{\sum_{j \in L} C_{jk}^{AP} W_{ij}^{freight} N_j}{\sum_{j \in L} N_j} + \frac{\sum_{j \in L} C_{ijk}^{AP} N_j}{\sum_{j \in L} N_j},$$

где $\bar{C}_i^{AP}$ — суммарное значение средних расходов в аэропорту для модели i ; C_{ijk}^{AP} — фиксированные расходы в аэропорту для рейса модели i на линии j по статье k , не зависящей от числа пассажиров и веса груза; $C_{jk}^{AP} n_{ij}^{pax}$ — средняя ставка за пассажира для статьи k , не зависящей от типа ВС; $C_{jk}^{AP} W_{ij}^{freight}$ — ставка за 1 кг груза для статьи k , не зависящей от типа ВС.

Расходы за аэронавигационное обслуживание на маршруте рассчитываются исходя из дальности полета, числа рейсов и средних ставок за аэронавигационное обслуживание на линиях с учетом характеристик каждой модели, сравниваемых ВС. Средние расходы за рейс на аэронавигационное обеспечение на маршруте определяются как

$$\bar{C}_i^{NAV} = \left(\sum_{j \in L} c_{ij}^{NAV} N_j \max(0; l_j - 20) / 100 \right) / \sum_{j \in L} N_j,$$

где l_j — протяженность линии j ³; c_{ij}^{NAV} — значение средней ставки на аэронавигационное обеспечение за 100 км.

Расходы на авиаГСМ / энергию рассчитываются для каждой модели сравниваемых ВС и каждой линии сети применения исходя из средней стоимости топлива/энергии с учетом дополнительных расходов (хранение, обеспечение заправки) и потребной массы топлива, необходимой для выполнения рейса и обусловленной характеристиками сравниваемых ВС⁴, а также дальностью и продолжительностью полета.

Средние за рейс расходы на авиаГСМ / энергию рассчитываются по формуле

$$\bar{C}_i^{F\&E} = \frac{\sum_{j \in L} CF_j F_{ij} N_j}{\sum_{j \in L} N_j} + \frac{\sum_{j \in L} CE_j E_{ij} N_j}{\sum_{j \in L} N_j},$$

где CF_j — значение средней стоимости авиаГСМ / топлива на линии j с учетом средних дополнительных расходов на обеспечение заправки и хранение авиаГСМ в регионе эксплуатации; CE_j — значение средней стоимости энергии на линии j с учетом средних дополнительных расходов на обеспечение заправки и хранение в регионе эксплуатации; F_{ij} — потребный объем топлива для выполнения рейса; E_{ij} — потребное число энергии для выполнения рейса.

Оценка F_{ij} может быть найдена через средний часовой расход топлива $F_{ij} = Fuel_{ij}^{maxR} t_{ij} / t_{ij}^{maxR}$, где $Fuel_{ij}^{maxR}$ — максимальная масса топлива, расходуемого на выполнение рейса со значением загрузки $PL_{ij}^{рейс}$ на предельную дальность; t_{ij}^{maxR} — продолжительность полета на предельную дальность l_{ij}^{maxR} со значением загрузки $PL_{ij}^{рейс}$ и максимальным объемом топлива; t_{ij} — продолжительность полета со значением загрузки $PL_{ij}^{рейс}$ на дальность l_j линии j .

Предельная дальность l_{ij}^{maxR} модели i с заданной коммерческой нагрузкой $PL_{ij}^{рейс}$ и при максимальном запасе топлива определяется как

$$l_{ij}^{maxR} = \min \left(\frac{l_i^{maxFuel} - l_i^{maxPL}}{PL_i^{maxFuel} - PL_i^{maxPL}} (PL_{ij}^{рейс} - PL_i^{maxPL}) + l_i^{maxPL}; \frac{l_i^{maxL} - l_i^{maxFuel}}{0 - PL_i^{maxFuel}} (PL_{ij}^{рейс} - PL_i^{maxFuel}) + l_i^{maxFuel} \right),$$

где $PL_i^{maxFuel}$ — максимальная допустимая масса загрузки при максимальной заправке топливом; PL_i^{maxPL} — максимальная масса полезной нагрузки; l_i^{maxPL} — дальность полета с максимальной

³ При расчете АНО на маршруте из расстояния исключаются 20 км зоны аэропортов.

⁴ В случае перспективных моделей используются предполагаемые или заявленные летно-технические характеристики.

полезной нагрузкой; $l_i^{maxFuel}$ — дальность полета с максимальной доступной полезной нагрузкой при максимальном запасе топлива; l_i^{maxL} — дальность перегонки.

Максимальная масса расходуемого топлива для заданной нагрузки $PL_{ij}^{пейс}$ при полете на предельную дальность вычисляется из весовой сводки модели ВС:

$$Fuel_{ij}^{maxR} = \left(\min \left(MRW_i - OEW_i - PL_{ij}^{пейс}, Fuel_i^{max} \right) - Fuel_i^{res} \right),$$

где MRW_i — максимальная рулевая масса модели i ; OEW_i — масса пустого снаряженного ВС; $Fuel_i^{max}$ — максимальная масса топлива ВС; $Fuel_i^{res}$ — масса резервов топлива самолета. Величины t_{ij}^{maxR} и t_{ij} хорошо описываются формулой от дальности l и крейсерской скорости $v_i^{кр}$ по формуле $t_i = (\alpha_i l + \beta_i) / v_i^{кр}$, где $\alpha_i \approx 1$, $\beta_i > 0$ — коэффициенты, определяемые статистически из профиля полета модели i .

Оценка E_{ij} зависит от формата использования электрической составляющей СУ в процессе полета. В случае если она задействована только на часть полета (например, при взлете и начальном наборе высоты), то заправка электричеством на каждый полет будет максимальной. Если же электрическая составляющая тяги работает весь полет, то потребное заправляемое количество (объем) энергии E_{ij} может быть оценено аналогично топливу:

$$E_{ij} = \left(E_i^{max} / \min(t_i^{maxR}, t_i^{maxEl}) \right) \min(t_{ij}, t_i^{maxEl}),$$

где E_i^{max} — максимальное количество (объем) энергии для модели i ; t_i^{maxEl} — максимальное время работы электрической составляющей СУ.

Расходы на техническое обслуживание и ремонт оцениваются отдельно для каждой сравниваемой модели в расчете на летный час за весь жизненный цикл ВС. Для перспективных летательных аппаратов, по которым нет данных, используются экспертные оценки на основе данных по аналогичным типам самолетов, а также данные открытых источников.

Расходы на ТОиР на усредненный рейс $\bar{C}_i^{Maint}$ для каждой модели определяются исходя из фактических продолжительностей рейсов на каждом элементе сети применения ВС конкурентной группы:

$$\bar{C}_i^{Maint} = \left(\sum_{j \in L} t_{ij} N_j / \sum_{j \in L} N_j \right) ch_i^{Maint} = \bar{t}_i^{пейс} ch_i^{Maint}, \quad (4)$$

где ch_i^{Maint} — ставка на ТОиР модели i за летный час, которая складывается из средней ставки за проведение периодического (линейного) ТОиР и средних резервов на проведение капитального ремонта.

Помимо затрат на проведение линейного ТОиР существенный объем расходов авиакомпаний приходится на проведение тяжелых форм технического обслуживания двигателей (например, капитальный ремонт), резервы на которые обычно формируются в ходе эксплуатации ВС, что связано с высокой стоимостью проведения конкретного вида работ. Для оценки затрат на капитальный ремонт существующих и перспективных ГТД, в частности турбовинтовых двигателей (ТВД), на основе данных Conclin & DeDecker⁵, найдена зависимость от максимальной мощности ТВД (рис. 1)⁶.

В случае применения ЭСУ — резервы на замену электрической части двигательной установки добавляются отдельным слагаемым $ch_i^{Maint} = ch_i^{M_{Line}} + ch_i^{M_{EngRes}} + ch_i^{M_{El}}$, где $ch_i^{M_{Line}}$ — ставка за проведение

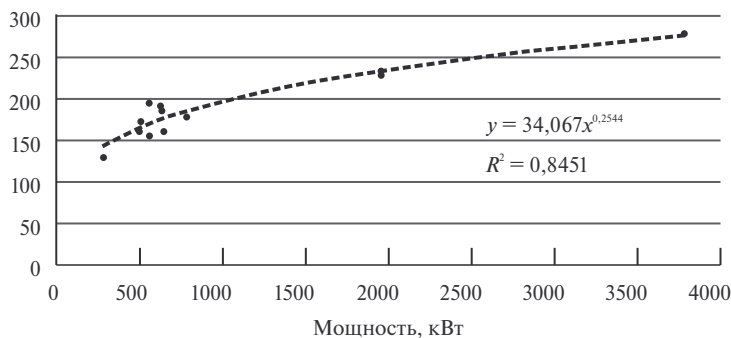


Рис. 1. Затраты на капитальный ремонт ТВД, долл./л.ч

⁵ <https://conklindecker.jetssupport.com/>

⁶ В статье на рис. 1–6 денежные затраты исчисляются в долларах США.

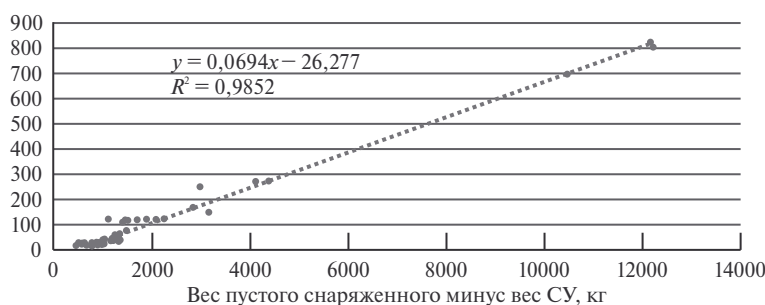


Рис. 2. Зависимость затрат на линейное ТОиР от веса пустого снаряженного ВС без СУ, долл./л.ч

линейного ТОиР за летный час; $ch_i^{M_{EngRes}}$ — резервы на проведение капитального ремонта неэлектрической части установки за летный час; $ch_i^{M_{El}}$ — резервы на замену электрической части установки за летный час.

Поскольку через каждые 2000 циклов должна производиться замена аккумуляторной батареи (АКБ) (Ribeiro et al., 2020), в методике предусмотрен учет резервов на амортизацию АКБ, которые могут быть оценены с учетом удельной стоимости АКБ за кВт × ч. Резервы на капитальный ремонт остальных элементов электрической составляющей двигательной установки на данном этапе в предположении не рассматриваются, потому что ресурсы электродвигателей, контроллеров и генераторов сопоставимы с ресурсом летательного аппарата в целом.

Оценка часовой ставки периодических расходов на ТОиР хорошо описывается линейной зависимостью ставки от веса пустого снаряженного ВС без веса СУ (рис. 2).

При использовании полученных зависимостей следует учитывать, что помимо рассмотренных переменных, на оценку расходов на ТОиР могут оказывать влияние такие ситуационные факторы, как, например: 1) соотношение ремонтных мощностей и располагаемого авиапарка, базирующегося в регионе; 2) модель организации техобслуживания, выбранная конкретной авиакомпанией (инсорсинг или аутсорсинг); 3) структура издержек авиакомпании или поставщика услуг ТОиР. Указанные факторы могут приводить к увеличению дисперсии затрат на ТОиР, относительно оцениваемых по представленной модели, не меняя, тем не менее, принципиального порядка величин относительно получаемых по ней оценок.

Расходы на оплату труда летного и cabinного экипажей оцениваются по расценкам региона и рассматриваемого класса авиационной техники исходя из требований к их составу и ставкам за летный час. Необходимо учитывать, что суммарная продолжительность полетного времени для члена экипажа не может превышать законодательно заданных значений⁷. Расходы на оплату труда экипажей на усредненный рейс $\bar{C}_{i,Lab}$ определяются исходя из продолжительностей рейсов на линиях:

$$\bar{C}_{i,Lab} = \sum_{j \in L} t_{ij} N_j (ch_i^{ЛЭ} + ch_i^{КЭ}) / \sum_{j \in L} N_j = \bar{t}_i^{рейс} (ch_i^{ЛЭ} + ch_i^{КЭ}),$$

где $ch_i^{ЛЭ}$ — суммарная ставка оплаты труда летного экипажа в час; $ch_i^{КЭ}$ — суммарная ставка оплаты труда cabinного экипажа в час.

Расходы на владение складываются из амортизационных отчислений, лизинговых платежей или финансирования привлеченного для покупки ВС кредита и пропорциональны рыночной стоимости каждой сравниваемой модели. Расходы на страховку определяются исходя из рыночной стоимости каждой сравниваемой модели.

Для применения методики к оценке стоимости перспективных ВС предлагается рассматривать стоимость СУ и стоимость всего остального самолета (планера и авиационных систем) отдельно.

⁷ Приказ Минтранса России от 21 ноября 2005 г. № 139 «Об утверждении Положения об особенностях режима рабочего времени и времени отдыха членов экипажей воздушных судов гражданской авиации Российской Федерации».

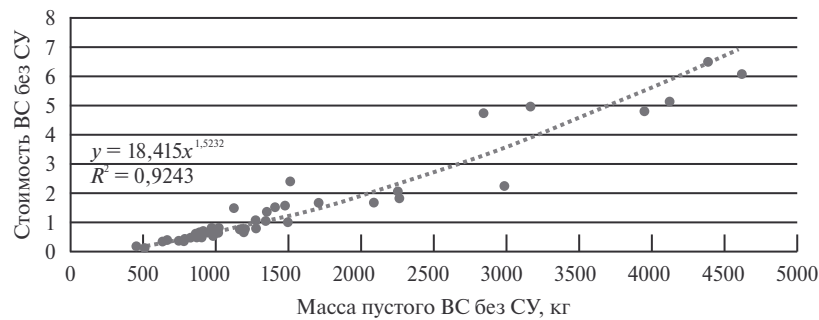


Рис. 3. Зависимость стоимости ВС без СУ от веса пустого снаряженного ВС без СУ, млн долл.

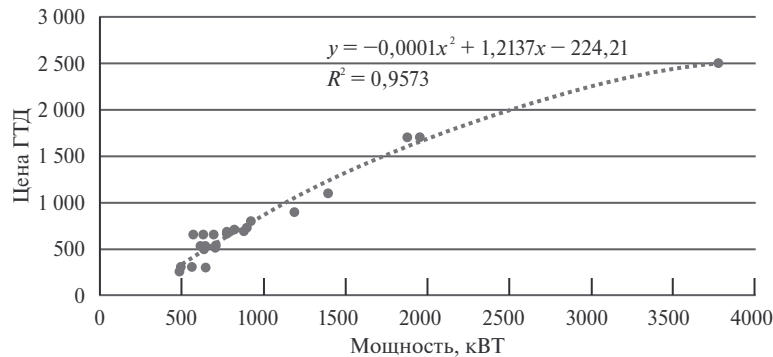


Рис. 4. Зависимость стоимости ГТД от мощности, тыс. долл.

Стоимость самолета МА без СУ хорошо описывается зависимостью от веса пустого снаряженного самолета минус вес СУ (рис. 3).

Стоимость СУ складывается из стоимостей ГТД и электрических составляющих ГСУ. Стоимость ГТД зависит от тяги (мощности) двигателей (рис. 4). Стоимость электрической составляющей двигательной установки оценивается через удельную стоимость ее основных составных компонентов (электродвигателей, генераторов, контроллеров, АКБ и т.д.) с учетом имеющихся прогнозов снижения удельной стоимости компонентов.

Годовые расходы на владение c_{il} зависят от цены ВС CMP_i через статистический размер лизинговой ставки или через формулу аннуитетного платежа в предположении, что самолеты приобретаются в лизинг на n лет со ставкой p процентов годовых и долей авансового платежа t :

$$c_{il} = CMP_i (1-t) p (1+p)^n / ((1+p)^n - 1). \quad (5)$$

Расходы на страховку определяются рыночной стоимостью каждой сравниваемой модели ВС. Средние расходы на страховку оцениваются в расчете на рейс как $1,6 \times 10^{-6}$ рыночной стоимости ВС плюс 4,7 долл. (Stoll, Veble Mikic, 2016): $c_i^{ins} = CMP_i x + s$, где c_i^{ins} — стоимость страховки в расчете на рейс; x, s — заданные коэффициенты.

Прочие статьи расходов, не зависящие от конкретной модели ВС и являющиеся постоянными, оцениваются экспертным путем с учетом структуры расходов авиакомпаний. Согласно (5) усредненные расходы на владение, страховку и прочие статьи постоянных расходов на рейс $\bar{C}_i^{Const}$ рассчитываются по формуле $\bar{C}_i^{Const} = \sum_k c_{ik} / N_i + c_i^{ins}$, где c_{ik} — годовое значение расходов по статье k постоянных расходов.

Удельные расходы на кресло-километр (ккм) определяются по формулам:

$$C_i^{ккм} = \frac{C_i^{рейс}}{\sum_{j \in L} K_{ij} N_j / \sum_{j \in L} N_j} \times \frac{\bar{n}_{i,рейс}^{pax} W}{\bar{n}_{i,рейс}^{pax} W + \bar{W}_{i,рейс}^{freight}}, \quad K_{ij} = \min \left(MaxSeats_i; \left(Pl_{ij} - W_{ij}^{freight} \right) / W \right) l_j,$$

где $C_i^{ккм}$ — средние суммарные расходы на кресло-километр модели i на сети применения L ; K_{ij} — максимально возможный объем работы модели i ВС, выраженный в доступных кресло-километрах, который может быть выполнен за один рейс на линии j с учетом протяженности полета и функциональных возможностей самолета; $MaxSeats_i$ — пассажироместность модели i .

3. ПРИМЕР РАСЧЕТА ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ РАСХОДОВ

Применение методики для расчета ПЭР рассмотрим на примере электрического самолета «Eviation Alice» текущего и перспективного поколений, а также функционально схожих с ними самолетов МА вместимостью 9–19 мест и формирующих конкурентную группу. При расчете учитывались следующие исходные данные, допущения и оценки.

1. При оценке заработных плат летного экипажа были использованы данные о средней оплате труда командиров и вторых пилотов ВС существующих моделей⁸, скорректированные с учетом относительного уровня заработных плат летных экипажей в РФ⁹. Для самолетов пассажировместимостью 19 мест численность экипажа определена в два человека, для 9-местных самолетов — 1 человек. Оплата труда для одночленного экипажа составляет 54 долл. за 1 л.ч. (летный час), а для двухчленного — 66 долл. за 1 л.ч.

2. Текущая оценочная стоимость электрического самолета «Eviation Alice» оценивается в 4 млн долл. Можно ожидать, что в 2030-е годы, по мере выхода на рынок конкурирующих продуктов и/или с ростом серийности цена на самолет снизится (Stoll, Veble Mikic, 2016). Оценка стоимости самолета «Eviation Alice» для 2030-х годов получена при условии сохранения ее текущей весовой сводки — максимальной взлетной массы и массы пустого снаряженного ВС (предполагаемое улучшение удельных весов элементов переведено в дополнительные модули АКБ, что приведет к росту дальности полета с 815 км до 1330 км) и составит 2,48 млн долл., из которых стоимость ВС без СУ — 2,2 млн долл., а стоимость электрической СУ — 280 тыс. долл. На рис. 5 представлены результаты оценки рыночных стоимостей для сравниваемых самолетов исходя из их параметров (весовой сводки, мощности ГТД и состава электрической части СУ).

3. Стоимость электрической составляющей двигательной установки определяется стоимостью компонентов при следующих допущениях (Stoll, Veble Mikic, 2016): стоимость генератора принята равной 200 долл. за 1 кВт мощности; стоимость контроллера электродвигателя — 100 долл. за 1 кВт мощности; электродвигателя — 50 долл. за 1 кВт мощности. Оценка стоимости АКБ получена на основе прогнозов (Mauler et al., 2021), а цена 1 кВт × ч АКБ в сборке на период 2020-х гг. может оцениваться в 94 долл., а в 2030-е годы — 62 долл.

4. Поскольку в рассмотрении участвуют перспективные самолеты с ЭСУ, в расчетах принято допущение, что используемая в ГСУ аккумуляторная батарея должна быть заменена через каждые 2000 циклов. Для электрического самолета «Eviation Alice» резервы на замену АКБ составят 39 долл. за рейс в период 2020-х годов и 43 долл. за рейс в 2030-х годов (увеличение расходов на АКБ для

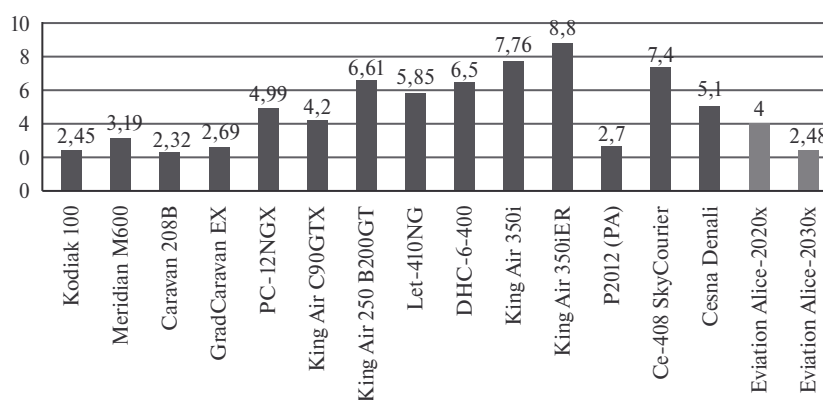


Рис. 5. Расчетные цены ВС конкурентной группы, млн долл.

⁸ <https://www.propilotmag.com/arc/>

⁹ <https://www.kommersant.ru/doc/4816292>



Рис. 6. Затраты на ТОиР для сравниваемых моделей самолетов, долл./л.ч

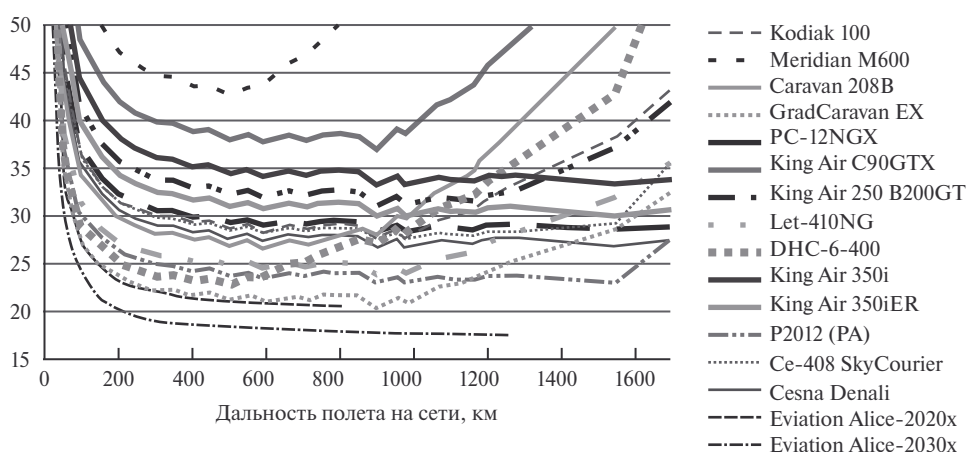


Рис. 7. Средние расходы на кресло-километр (ккм) от дальности при средних ценах на топливо, руб.

«Eviation Alice» связано с увеличением емкости АКБ на 63% и снижением ее удельной стоимости на 34%). На рис. 6 представлены результаты оценки затрат на ТОиР для сравниваемых самолетов.

5. Тарифы на услуги в аэропорту учтены комплексно и определены как средние взвешенные значения по аэропортам сети применения.

6. С учетом перспективы существенного изменения стоимости авиационного керосина к 2035 г. (под влиянием изменения стоимости нефти, расширения использования синтетического авиатоплива и введения различного вида платежей за дополнительные выбросы углерода в атмосферу¹⁰) в качестве допущения стоимость топлива в среднем принята 1100 долл. за 1 т.

7. Поскольку самолеты с ГСУ и электрические самолеты предполагают зарядку АКБ на земле, в расходах на топливо и энергию также необходимо учесть расходы на зарядку электроэнергией. В качестве допущения перспективная стоимость 1 кВт × ч электроэнергии была принята на уровне 7 руб. за 1 кВт × ч (с учетом курса конвертации валют соответствует среднему значению для стоимости энергии в (Stoll, Veble Mikic, 2016)), а эффективность зарядки — на уровне 95%.

На рис. 7 представлен результат расчетов средних удельных расходов на кресло-километр для самолета «Eviation Alice» и его конкурентной группы.

Сравнение удельных расходов показывает, что самолет «Eviation Alice» в технологиях 2020-х годов имеет более низкие удельные расходы на кресло-километр, чем у всех существующих самолетов конкурентной группы, при этом существенно уступая им по дальности полета и по взлетно-посадочным характеристикам. В то же время развитие технологий электромашин и АКБ

¹⁰ Так называемого углеродного налога (Клочков, Охапкин, 2021).

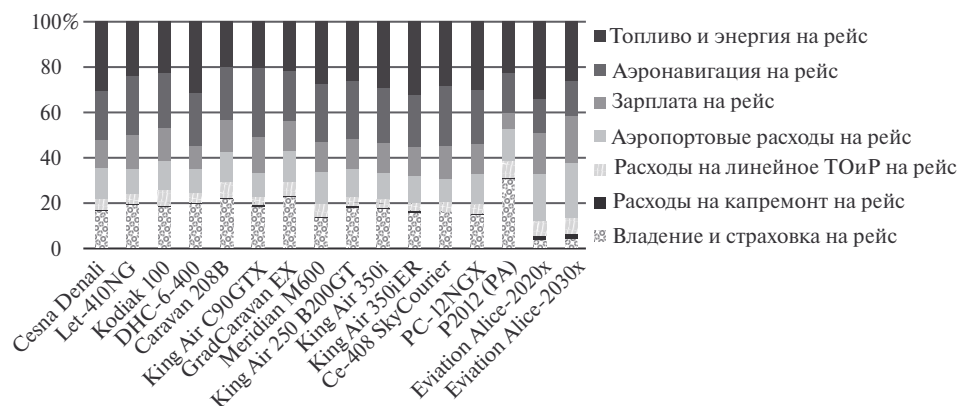


Рис. 8. Структура расходов самолетов МА для средних цен на авиатопливо

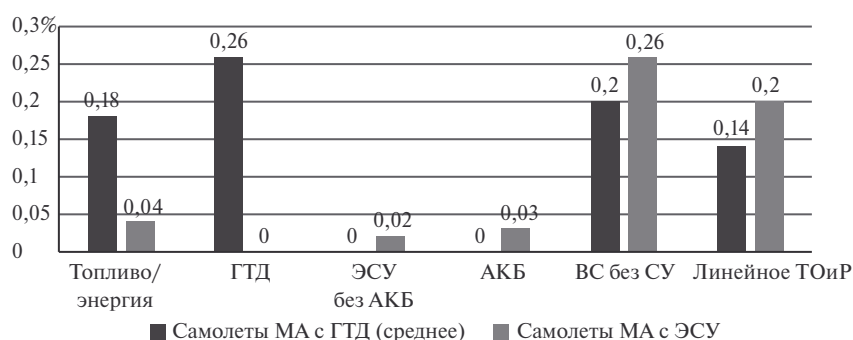


Рис. 9. Чувствительность уровня расходов самолетов МА по факторам стоимости (изменение уровня ПЭР при изменении фактора на 1%), %

в 2030-е годы позволит электрическому самолету «Eviation Alice» без изменения максимальной взлетной массы (МВМ) существенно приблизиться по дальности полета к летно-техническим характеристикам большинства самолетов МА.

Полученная в ходе расчета структура прямых эксплуатационных расходов по статьям представлена на рис. 8. В целом для большинства существующих самолетов МА наблюдается схожее распределение расходов по статьям затрат, из которых наиболее затратными являются техническое обслуживание и владение. Исключение составляет поршневой «Tecnam P2012», обладающий относительно низкой ценой, но большим расходом топлива. Существенные изменения в структуре себестоимости перевозки наблюдаются у электрических самолетов «Eviation Alice» с АКБ. Для них доля расходов на топливо и энергию составит менее 4–5% общей себестоимости перевозки. При этом доля аэропортовых расходов увеличится почти вдвое, поскольку 9-местный электрический самолет обладает МВМ, сопоставимой с МВМ 19-местного ВС.

Анализ чувствительности уровня ПЭР к факторам показал, что самолеты с ГТД обладают высоким потенциалом снижения ПЭР за счет удешевления наиболее дорогого агрегата самолета — СУ (при сокращении стоимости ГТД на 1% снижение ПЭР составит около 0,26%), а также за счет сокращения стоимости ВС без СУ (0,2% снижения ПЭР при снижении стоимости ВС без СУ на 1%) и повышения топливной эффективности (0,18% снижения ПЭР при снижении расходов на топливо на 1%) (рис. 9).

ПЭР электрических самолетов МА обладают низкой чувствительностью к стоимости электроэнергии, электромашин и АКБ. Наибольшее удешевление ПЭР может быть достигнуто за счет факторов, не связанных с ЭСУ, — снижения стоимости ВС без СУ и линейного технического обслуживания.

Чувствительность ПЭР традиционных самолетов к стоимости ГТД выше, чем к расходам на топливо (топливная эффективность). Поскольку затраты на улучшение характеристик по мере зрелости технологии увеличиваются, такое соотношение может свидетельствовать об экономически

обоснованном пределе улучшения характеристик ГТД, достижение которого потребует перехода на новые технологии СУ. Нахождение подобного предела при учете изложенных в статье результатов может служить темой отдельного исследования.

Развитие технологий в области электромашин и АКБ (главным образом, способствующих повышению плотности энергии АКБ) может расширить диапазоны применения самолетов с ЭСУ и сделать все турбовинтовые самолеты неконкурентоспособными на маршрутах протяженностью до 1000 км (основных маршрутах применения таких самолетов). Моделирование показало, что возможна ситуация, когда самолет с ЭСУ, подобный самолету «Eviation Alice» в технологиях 2030-х годов, при пассажировместимости 19 мест¹¹ и дальности полета около 900 км будет обладать ПЭР около 8–10 руб/ккм, что превосходит по экономичности перевозки не только всех существующих самолетов МА с традиционной СУ, но и более крупные по вместимости турбовинтовые региональные самолеты (ПЭР около 10–13 руб/ккм).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе предложена методика оценки ПЭР перспективных самолетов МА с альтернативными типами силовых установок. В основе методики лежат найденные авторами регрессионные зависимости между мощностью силовой установки и ее стоимостью, уровнем расходов на техобслуживание и ремонт силовой установки, стоимостью ВС и расходов на линейное обслуживание самолета от его массовых характеристик. Найденные зависимости позволяют рассматривать расходы, связанные с силовой установкой и остальными составляющими самолета, обособленно друг от друга, что позволит получать сравнимые между собой оценки себестоимости перевозки на сети применения для перспективных ВС.

Предлагаемый в статье подход демонстрируется на примере расчета ПЭР для наиболее перспективного на сегодняшний день электрического самолета МА — «Eviation Alice», вместе с действующими ВС МА его конкурентной группы. Анализ полученных результатов показал, что электрический самолет 2020-х годов обладает более низкими удельными расходами на кресло-километр, чем у всех существующих самолетов конкурентной группы, при этом существенно уступая им по дальности полета и по взлетно-посадочным характеристикам. С учетом развития технологий АКБ в 2030-х годах, без изменения МВМ, электрический самолет «Eviation Alice» сможет существенно приблизиться по дальности полета к своим конкурентам. Отличия могут наблюдаться в структуре себестоимости перевозки между классическими и электрическим ВС: для вторых доля расходов на топливо и энергию значительно сократится и составит менее 4–5% общей себестоимости перевозки, но из-за роста массы ВС почти вдвое вырастут аэропортовые расходы. В перспективе конкурентоспособность всех турбовинтовых самолетов в сегменте до 1000 км будет снижаться.

Предложенная в статье методика может быть использована как инструмент моделирования и оценки прямых эксплуатационных расходов отечественных перспективных ВС разных размеров как с ГТД, так и с гибридными, и электрическими СУ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

- Власенко А.О., Сухарев А.А., Урюпин И.В.** (2023). Оценка качества функционирования авиатранспортной системы как инструмент формирования требований к перспективной авиационной технике // *Управление большими системами*. Вып. 104. С. 73–99. [Vlasenko A.O., Sukharev A.A., Uryupin I.V. (2023). Developing the air transportation system quality assessment tools to define the main requirements for future aircraft. *Large-Scale Systems Control*, 104, 73–99 (in Russian).]
- Иванилов Ю.П., Лотов А.В.** (1979). Математические модели в экономике. Учебное пособие для вузов. М.: Наука. [Ivanilov Y.P., Lotov A.V. (1979). *Mathematical models in economics. Textbook for universities*. Moscow: Nauka (in Russian).]
- Клочков В.В., Охапкин А.А.** (2021). Международное регулирование в области защиты окружающей среды от воздействия авиации и новые вызовы экономической безопасности России // *Экономическая безопасность*. № 4. С. 1329–1346. [Klochkov V.V., Okhapkin A.A. (2021). International regulation of environmental

¹¹ Увеличение пассажировместимости потребует существенного увеличения кабины ВС, которое не рассматривалось в данной прикидочной оценке, но может негативно сказаться на уровне расходов.

protection from the aviation effects and new challenges to the economic security of Russia. *Economic Security*, 4, 1329–1346 (in Russian).]

Клочков В.В., Русанова А.Л., Максимовский В.И. (2010). Экономико-математическое моделирование процессов освоения серийного производства новых гражданских самолетов // *Вестник Московского авиационного института*. Т. 17. № 3. С. 235–245. [Klochkov V.V., Rusanova A.L., Maksimovskiy V.I. (2010). Economic-mathematical modeling of new civil aircraft production launching processes. *Aerospace MAI Journal*, 17, 3, 235–245 (in Russian).]

Кородюк И.С., Гринев Д.М. (2019). Методические особенности определения себестоимости услуг регулярных пассажирских авиаперевозчиков для различных видов коммерческой загрузки // *Транспортное дело России*. № 1. С. 147–150. [Korodyuk I.S., Grinyov D.M. (2019). Methodical features of determining the cost of services of regular passenger air carriers for various types of commercial load. *Transport Business of Russia*, 1, 147–150 (in Russian).]

Манвелидзе А.Б. (2018). Расходы на эксплуатацию воздушных судов крупных американских авиаперевозчиков // *Стратегические решения и риск-менеджмент*. № 4 (107). С. 72–91. [Manvelidze A.B. (2018). Operating expenses for large American air carriers. *Strategic Decisions and Risk Management*, 4, 107, 72–91 (in Russian).]

Опрышко Н.В., Опрышко Ю.В., Рубан Н.В. (2013). Динамическая модель оценки затрат на эксплуатацию пассажирского воздушного судна // *Электронный журнал «Труды МАИ»*. № 69. Режим доступа: <https://trudymai.ru/published.php?ID=43301> [Opryshko N.V., Opryshko Y.V., Ruban N.V. (2013). Dynamic model to calculate operating costs of passenger aircraft. *Trudy MAI*, 69. Available at: <https://trudymai.ru/published.php?ID=43301> (in Russian).]

Халютин С.П., Давидов А.О., Жмуров Б.В. (2017). Электрические и гибридные самолеты: перспективы создания // *Электричество*. № 9. С. 4–16. [Khalyutin S.P., Davidov A.O., Zhmurov B.V. (2017). Electric and hybrid aircraft development prospects. *Electricity*, 9, 4–16 (in Russian).]

Finger D.F., Goetten F., Braun C., Cees B. (2019). Cost estimation methods for hybrid-electric general aviation aircraft. In: *2019 Asia-Pacific International Symposium on Aerospace Technology (APISAT 2019)*, 265–277.

Fioriti M., Vercella V., Viola N. (2018). Cost-estimating model for aircraft maintenance. *Journal of Aircraft*, 55, 4, 1564–1575.

Fregnani J.A., Mattos B.S., Hernandez J.A. (2019). An innovative approach for integrated airline network and aircraft family optimization. In: *AIAA Aviation 2019 Forum*, 2865. DOI: 10.2514/6.2019-2865

Hoelzen J., Silberhorn D., Zill T., Bensmann B., Hanke-Rauschenbach R. (2022). Hydrogen-powered aviation and its reliance on green hydrogen infrastructure-review and research gaps. *International Journal of Hydrogen Energy*, 47, 5, 3108–3130.

Mauler L., Duffner F., Zeier W.G., Leker J. (2021). Battery cost forecasting: A review of methods and results with an outlook to 2050. *Energy & Environmental Science*, 14, 9, 4712–4739.

Ribeiro J., Afonso F., Ribeiro I., Ferreira B., Policarpo H., Peças P., Lau F. (2020). Environmental assessment of hybrid-electric propulsion in conceptual aircraft design. *Journal of Cleaner Production*, 247, 119477.

Roy S., Crossley W.A., Moore K.T., Gray J.S., Martins J.R. (2019). Monolithic approach for next-generation aircraft design considering airline operations and economics. *Journal of Aircraft*, 56, 4, 1565–1576.

Stoll A.M., Veble Mikic G. (2016). Design studies of thin-haul commuter aircraft with distributed electric propulsion. In: *16th AIAA Aviation Technology, Integration, and Operations Conference*, 3765. DOI: 10.2514/6.2016-3765

Washington S., Karlaftis M.G., Mannering F., Anastasopoulos P. (2020). *Statistical and econometric methods for transportation data analysis*. CRC press. 496 p.

Woehler S., Hartmann J., Prenzel E., Kwik H. (2019). Preliminary aircraft design for a mid-range reference aircraft taking advanced technologies into account as part of the AVACON project for an entry into service in 2028. DOI: 10.25967/480224. Available at: <https://www.dglr.de/publikationen/2019/480224.pdf>

Method of estimating direct operating costs for prospective aircraft with alternative propulsion systems

© 2024 I.V. Uryupin, A.O. Vlasenko

I.V. Uryupin,

*Federal Research Center “Computer Science and Control” of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia;
e-mail: uryupin93@yandex.ru*

A.O. Vlasenko,

Intersectoral analytical center, Moscow, Russia; e-mail: andrey.vlasenko84@gmail.com

Received 06.06.2023

Abstract. At present, in an unstable geopolitical situation, one of the most important tasks for the Russian Federation is the creation of advanced domestic aircraft that will not be inferior to its foreign counterparts. The cost of operating is the main criterion in the design of a new aircraft to ensure competitiveness in air transport systems. This article provides new regression relations between the power or thrust of a propulsion system and its cost — the level of costs for maintenance and repair of the propulsion system. These relationships make it possible to consider the costs of the propulsion system and airframe separately from each other. This approach makes it possible to obtain estimates of the cost of transportation for existing and promising aircraft, both with classic gas turbine engines and with hybrid and electric propulsion systems. The article provides a method for estimating direct operating costs for promising light aircraft based on these relationships. The calculation of operating costs and cost structure using the example of the “Eviation Alice” electric aircraft and similar functional analogs is demonstrated.

Keywords: mathematical modeling, aviation technology, direct operating costs, competitiveness.

JEL Classification: C51, L93, O32.

UDC: 338.45.

For reference: **Uryupin I.V., Vlasenko A.O.** (2024). Method of estimating direct operating costs for prospective aircraft with alternative propulsion systems. *Economics and Mathematical Methods*, 60, 2, 92–104. DOI: 10.31857/S0424738824020087 (in Russian).