

ОЦЕНКА КАЧЕСТВА ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ АВИАТРАНСПОРТНОЙ СИСТЕМЫ КАК ИНСТРУМЕНТ ФОРМИРОВАНИЯ ТРЕБОВАНИЙ К ПЕРСПЕКТИВНОЙ АВИАЦИОННОЙ ТЕХНИКЕ

Власенко А. О.¹,

(ООО «Межотраслевой аналитический центр», Москва)

Сухарев А. А.²

*(Национальный исследовательский университет
«Высшая школа экономики», Москва)*

Урюпин И. В.³

*(Федеральное государственное учреждение
«Федеральный исследовательский центр
«Информатика и управление» РАН», Москва)*

Предложены новые метрики «качества» авиатранспортной системы – физической и экономической доступности авиaperевозки для пассажира, применение которых в стратегическом планировании для постановки согласованной системы целей и задач долгосрочного развития гражданской авиационной деятельности и научно-технологического развития авиастроения позволит гармонизировать интересы ее ключевых стейкхолдеров – государства, конечных пользователей авиатранспорта, эксплуатантов, производителей гражданской авиатехники и организаций авиационной науки. Описана методика получения точечной и интегральной оценок качества авиатранспортной системы для пассажира по выбранной мере преодоления пространства, математическая модель и алгоритм их вычисления. Реализация методики продемонстрирована на базе разработанного программного комплекса, оперирующего доступной для сбора или приобретения статистической информацией. Возможность применения метрик к задаче формирования требований к перспективной авиатехнике показаны на примере количественной оценки влияния на качество авиатранспортной системы замены региональных самолетов с газотурбинными двигателями на «более электрические» самолеты вдвое меньшей вместимости.

Ключевые слова: стратегическое планирование, доступность авиaperевозки, оценка качества авиатранспортной системы, математическое моделирование, гарантированное время путешествия, требования к перспективным самолетам.

¹ Андрей Олегович Власенко, с.н.с. (andrey.vlasenko84@gmail.com).

² Алексей Александрович Сухарев, аспирант (alx.sukharev@gmail.com).

³ Илья Вадимович Урюпин, м.н.с., к.ф.-м.н. (iryupin93@yandex.ru).

1. Введение

Гражданская авиационная деятельность в России осуществляется в ходе взаимодействия между собой и со внешней средой трех взаимосвязанных открытых систем: авиатранспортной системы (АТС), авиапромышленности и (3) авиационной науки. Наблюдаемая в России период до начала 2022 года полицентричность стратегического управления указанными системами, свободный доступ участников гражданской авиационной деятельности к зарубежным рынкам авиатехники и технологий обусловили развитие следующих последовательно связанных друг с другом дисбалансов, оказывающих взаимное отрицательное воздействие на достижение целей государства в области развития всех компонентов гражданской авиационной деятельности. В АТС – антагонизма физической и экономической доступности перевозок для населения: авиакомпания, планирующие расписание исходя из максимизации дохода при приемлемой стоимости билета, часто делают выбор в пользу сокращения частот полетов (до 1–3 в неделю и менее), производя их на обладающих лучшей удельной экономичностью наиболее вместительных в классе зарубежных самолетов. В авиапромышленности – ориентации на требования к размерности самолетов, формируемые эксплуатантами, исходя из максимизации дохода от перевозок; в то же время – слабой заинтересованности в результатах деятельности организаций отраслевой науки. В авиационной науке – рассогласования развиваемых технологических направлений с реальными потребностями авиапрома.

Наблюдаемое в настоящее время усиление роли государства как регулятора, проводника интересов населения, основного интересанта развития и спонсора всех трех систем, участвующих в гражданской авиационной деятельности, создает предпосылки к устранению описанных дисбалансов за счет перехода к согласованному стратегическому целеполаганию. Среди представителей рассматриваемых отраслей экономики и заинтересованных органов государственной власти растет понимание того, что в новых экономических условиях единой долгосрочной целью гражданской авиационной деятельности, соответствующей балансу интересов авиатранспортного и авиапромышленного комплексов

с интересами населения, целесообразно считать обеспечение авиатранспортной связности территории РФ при сохранении приемлемой доходности вовлеченного в нее бизнеса.

Декомпозиция указанной цели на упомянутые выше три основные системы гражданской авиационной деятельности может быть осуществлена в следующей последовательности. Во-первых, для системы авиаперевозок целесообразно задать и установить «эталонное» значение критериев авиационной связности территории, сформировать под него целевой облик авиатранспортной сети. Во-вторых, для авиапромышленности – на основе целевого облика сети определить требования к характеристикам, потребные структуру и объемы выпуска авиатехники. В-третьих, для авиационной науки, руководствуясь требованиями к перспективной технике, выделить спектр ключевых технологий, который бы обеспечил возможность её создания. Каждый из указанных шагов требует введения в оборот метрик качества АТС для населения. Целью исследования, описанного в настоящей статье, являлось формирование состава и методики расчета показателей, характеризующих качество АТС для населения.

Для долгосрочного целеполагания в области гражданской авиационной деятельности одной из актуальных задач является совершенствование методов научного обоснования требований к технико-экономическим характеристикам перспективной гражданской авиатехники [9] с учетом целевых показателей качества АТС для пассажира. На практике задание требований к авиатранспорту сводится к моделированию применения воздушных судов с различными характеристиками в АТС и сравнению получаемых параметров АТС, которое в конечном итоге позволяет сформировать рациональный перечень функциональных платформ (разрабатываемых типов перспективных воздушных судов) и потребных для их создания технологий [3].

Наиболее распространенный подход к определению требований к перспективному самолету заключается в анализе сети и оценке доли работы, доступной для воздушного судна в зависимости от его характеристик. Подобный подход использован, например, в работе [14], в результате которой на основе анализа европейской сети аэропортов были определены требования

к дальности полета международного проекта FutPrInt50, предусматривавшего формирование облика регионального самолета с гибридной силовой установкой.

На анализе существующей сети аэропортов построены исследования [13] и [25], в ходе которых определялись предварительные требования к основным характеристикам перспективного магистрального самолета. Процесс определения требований к перспективному самолету включал как сравнение с существующими воздушными судами (ВС), так и моделирование на сети аэропортов, используемое для определения потребной длины взлетно-посадочной полосы.

Более комплексный подход к определению требований к характеристикам перспективных ВС состоит в постановке и решении задачи оптимизации. В зарубежных исследованиях характеристики ВС выбираются, как правило, в результате решения задачи максимизации прибыли авиакомпании. Подобный подход был применен, например, в работах [11, 15, 16], в ходе которых проводилась совместная оптимизация авиационной сети и семейства самолетов на сети между 20 крупнейшими аэропортами Бразилии. В качестве критерия выступала прибыль на сети, а в число оптимизируемых параметров входили характеристики самолетов. Похожий подход к определению технического лица перспективного воздушного судна путем моделирования его эксплуатации и максимизации прибыли авиакомпаний также был применен в [22].

В то же время, как указано в [12], выбор характеристик гражданских самолетов не должен производиться исходя исключительно из экономической эффективности авиаперевозок. Не менее важно, чтобы при применении самолета были обеспечены доступность и качество услуг авиационного транспорта для населения [10], т.е. возможность добраться до нужного пункта назначения за приемлемое время.

В зарубежных публикациях критериям доступности перевозок для населения уделено большое внимание. Например, в общеевропейском стратегическом документе Flightpath 2050 [28] среди долгосрочных целей в области доступности и качества перспективной АТС Европейского Союза (ЕС) фигурирует обеспечение для 90% пассажиров возможности осуществлять поездки

по территории ЕС за время путешествия «от двери до двери», не превышающее 4 часа. Проведенная в [18] оценка показывает, что достижение показателя «время поездки для 90% пассажиров составляет не более 4 часов» будет весьма затруднительно или невозможно без масштабного внедрения летательных аппаратов, разработанных с применением инновационных технологий. Аналогичные показатели для других регионов мира рассмотрены, например, в работе [25].

Для условий Российской Федерации подход для частного случая определения времени поездки, необходимого для достижения столицы субъекта РФ из его населенных пунктов, представлен в [5]. Задача оценки транспортной связанности и качества транспортного обслуживания поставлена также в работе [4].

Для случая малонаселенных труднодоступных регионов Российской Федерации при допущении о равномерном размещении населения и аэропортов местных линий по территории в работе [7] построена экономико-математическая модель, позволяющая оценивать влияние технико-экономических характеристик используемых на местных линиях воздушных судов на АТС. Похожий подход применен и в [6] при оценке требований к основным технико-экономическим характеристикам скоростных винтокрылых летательных аппаратов, предназначенных для эксплуатации в условиях удаленных и труднодоступных регионов. При этом дополнительно в работах [6, 7] решалась задача оптимизации размещения аэропортов из условий равномерной плотности населения.

В то же время необходимо отметить, что допущение о равномерном распределении населения в рамках субъекта РФ может оказывать существенное влияние на результаты моделирования для АТС в целом, поскольку население живет преимущественно в поселениях, соединенных с пунктами вылета и прилета наземным сообщением. В настоящей статье предлагаются пути устранения этого недостатка учетом в моделировании фактического расположения населения и объектов транспортной инфраструктуры.

В целом выбор оптимального расположения аэропортов является достаточно сложной задачей и тесно связан с анализом существующей сети аэропортов, дорог, населенных пунктов

и предполагаемым использованием аэропортов. Примером ее решения может быть опубликованный в 2020 г. и обновленный в 2022 г. Федеральной авиационной администрацией США (FAA) Национальный план по созданию интегрированной аэропортовой системы [29]. Одной из целей работы была разработка плана расширения доступа населения к авиатранспортной инфраструктуре. Для этого из всех существующих аэропортов США были выбраны около 3,29 тыс. (включая 8 новых аэропортов, запланированных к созданию), из которых около 380 являлись «основными», а 2,9 тыс. – «неосновными» аэропортами, преимущественно аэропортами авиации общего назначения, не вовлеченными пока в систему коммерческих авиаперевозок США. В работе показано, что добавление в систему «неосновных» аэропортов позволит повысить долю населения, проживающего в 30 милях от аэропорта (принятый в работе критерий доступности), с 95% до 99,7%. Именно на этих 3,3 тыс. аэропортах будет реализована концепция будущей региональной авиационной мобильности NASA [30], предусматривающая масштабный возврат воздушных судов малой авиации, но уже оснащенных гибридными или электрическими двигателями, в сегмент коммерческих авиаперевозок.

Таким образом, на базе рассмотренных источников можно заключить, что наиболее распространенные подходы к определению требований к перспективной авиатехнике ориентированы на выбор характеристик ВС и построение (моделирование) АТС исходя из максимизации доступной доли транспортной работы и/или прибыли авиакомпаний. Их недостаток заключается в отсутствии учета необходимости обеспечить приемлемые для населения время путешествия «от двери до двери» и физическую доступность перевозок. В то же время существующие подходы к оценке качества АТС либо слишком требовательны к детализации данных и не вполне применимы в задачах прогнозирования, либо не затрагивают всю АТС в целом, либо не учитывают фактические географические данные о населении и объектах транспортной инфраструктуры.

Предлагаемый в статье подход к оценке качества АТС для пассажира способен устранить вышеописанные недостатки. В нем используется алгоритм нахождения численных оценок

критериев на основе фактических данных о расположении населения и объектов наземной транспортной инфраструктуры, а также годовом количестве рейсов по линиям. Подобный перечень данных может быть получен как для существующих, так и для перспективных состояний АТС, что делает алгоритм применимым в задачах моделирования различных сценариев развития АТС. Результаты оценки качества функционирования АТС могут быть использованы в качестве граничного условия оптимизационных задачах определения требований к перспективным разрабатываемым моделям авиатехники, а также при сравнении результатов применения в АТС альтернативных обликов гипотетических воздушных судов, требующих применения разных портфелей технологий.

2. Методический подход к оценке качества функционирования АТС для населения

Для характеристики качества АТС для населения предлагается использовать меры преодоления пространства – время, стоимость и расстояние. В рамках статьи подход к оценке качества АТС продемонстрирован на примере одной из этих мер – времени путешествия, – однако большинство приведенных далее расчетных формул могут быть в равной степени использованы и для оценки стоимости или дальности поездки.

Суммарное время путешествия «от двери до двери» T складывается из двух компонентов: времени подвоза $T_{\text{подв}}$ (от населенного пункта отправления до аэропорта вылета и от аэропорта назначения до конечного населенного пункта) и времени $T_{\text{авиа}}$, которое пассажир проводит в авиатранспортной системе:

$$(1) \quad T = T_{\text{подв}} + T_{\text{авиа}}.$$

Поскольку значительное влияние на достижимость показателя времени путешествия «от двери до двери» может оказывать время доступа к аэропорту [24], нахождение времени T разбивается на две подзадачи:

1) оценка транспортной доступности аэропортов для населения,

2) оценка связности и характеристик маршрутов путешествий в авиатранспортной сети – требуемого времени, стоимости, количества пересадок и др.

Последовательно рассмотрим алгоритм решения указанных подзадач.

2.1. ОЦЕНКА ДОСТУПНОСТИ АЭРОПОРТОВ

Подзадача решается с целью нахождения следующих характеристик зон подбора аэропортов: численности населения, проживающего в зоне подбора аэропорта, и среднего взвешенного по населению времени подвоза в аэропорт или из него. Для упрощения принято допущение, что время движения по дороге от аэропорта и до аэропорта равны.

Поскольку в окрестностях населенного пункта может быть больше одного аэропорта, возникает задача оценки потоков из населенного пункта в аэропорты. Для решения этой задачи выполнена оценка транспортной доступности.

Методы оценки транспортной доступности, описанные, например, в [1, 2, 8, 23], сводятся к определению степени взаимодействия между множествами начальных и конечных пунктов. В нашей подзадаче начальные пункты совпадают с населенными пунктами, конечные пункты – с доступными из них аэропортами.

Для оценки транспортной доступности аэропортов из населенных пунктов применен метод расчета корреспонденций на основе модифицированной гравитационной модели, называемый в литературе по экономике транспорта и пространственной экономике также методом инверсионных балансов. Данный метод позволяет учесть характеристики как начальных, так и конечных пунктов. Общая формула, описывающая связи между начальными и конечными пунктами, имеет вид

$$(2) L_{i,j} = a_i b_j O_i D_j f(c_{i,j}),$$

где $L_{i,j}$ – показатель оценки взаимодействия между пунктами i и j ; O_i – количественный показатель начального пункта i (доля численности населения в населенном пункте от общей численности населения); D_j – количественный показатель конечного пункта j (доля исходящего пассажиропотока из аэропорта от суммарного

пассажиropотока в системе); a_i и b_j – балансировочные коэффициенты, обеспечивающие необходимое соотношение между количественными показателями начальных точек и конечных точек; $c_{i,j}$ – мера преодоления пространства между i и j (время, стоимость или расстояние); $f(c_{i,j})$ – функция меры преодоления пространства.

Балансировочный коэффициент a_i обеспечивает соответствие суммарного исходящего потока из начального пункта i его количественному показателю O_i , а коэффициент b_j – входящего в пункт j потока D_j . Балансировочные коэффициенты являются взаимозависимыми и с учетом соотношений $O_i = \sum_{j=1}^m L_{i,j}$ и $D_j = \sum_{i=1}^n L_{i,j}$ описываются формулами

$$(3) \quad a_i = \left[\sum_{j=1}^m b_j D_j f(c_{i,j}) \right]^{-1},$$

$$(4) \quad b_j = \left[\sum_{i=1}^n a_i O_i f(c_{i,j}) \right]^{-1}.$$

Процедура получения коэффициентов a_i и b_j носит итерационный характер. На первом шаге значения b_j приравняются единице. Далее по формулам (3) и (4) последовательно вычисляются a_i и b_j . Вычисления повторяются до тех пор, пока значения a_i и b_j перестают существенно изменяться. Данное условие описывается формулой

$$(5) \quad \sum_{i=1}^n \frac{|a^{(k)}_i - a^{(k-1)}_i|}{n} + \sum_{j=1}^m \frac{|b^{(k)}_j - b^{(k-1)}_j|}{m} < \varepsilon,$$

где ε – заданное значение изменения коэффициентов; k – номер итерации; m – количество аэропортов; n – количество населенных пунктов.

Естественной и наиболее универсальной мерой преодоления пространства $c_{i,j}$ выступает время, необходимое для движения между i и j . В качестве функции от меры преодоления пространства в методах оценки транспортной доступности рекомендуется выбирать быстро убывающую функцию (обычно экспоненциальную с отрицательной степенью). В нашем случае дополнительно необходимо учитывать предельное время подвоза до аэропорта, начиная с которого данный аэропорт становится не актуален для населенного пункта – аналог изохроны:

$$(6) \quad f(c_{i,j}) = \max \left(0, \text{sign}(t_0 - c_{i,j}) \right) e^{-c_{i,j}},$$

где t_0 – предельное максимальное время от населенного пункта до аэропорта, начиная с которого принимается, что связи между населенным пунктом и аэропортом нет.

После нахождения коэффициентов a_i и b_j для каждой из конечных точек (аэропортов) численность населения в зоне подбора и среднее взвешенное по населению значение времени подвоза определяются по формулам

$$(7) \text{Pop}_{\text{ап},j} = \sum_{i=1}^n a_i b_j D_j f(c_{i,j}) \text{Pop}_i,$$

$$(8) T_{\text{подв},j} = \sum_{i=1}^n a_i b_j D_j f(c_{i,j}) \text{Pop}_i T_{i,j} / \text{Pop}_{\text{ап},j},$$

где $\text{Pop}_{\text{АП},j}$ – численность населения в зоне подбора аэропорта j ; $T_{\text{подв},j}$ – среднее взвешенное время подвоза для аэропорта j ; Pop_i – численность населения в населенном пункте i ; $T_{i,j}$ – время пути между населенным пунктом i и аэропортом j .

Полученные значения численности населения в зонах подбора $\text{Pop}_{\text{АП},j}$ и времени подвоза для аэропортов $T_{\text{подв},j}$ используются при оценке качества функционирования АТС.

Аналогично формуле (8) для аэропортов могут быть вычислены средние взвешенные по населению стоимость подвоза $S_{\text{подв},j}$ и расстояние подвоза $d_{\text{подв},j}$.

Поскольку основным результатом решения подзадачи является определение $\text{Pop}_{\text{АП},j}$, условие (5) может быть переписано в виде

$$(9) \sum_{j=1}^m \left| \text{Pop}_{\text{ап},j}^{(k)} - \text{Pop}_{\text{ап},j}^{(k-1)} \right| < \varepsilon_{\text{pop}},$$

где ε_{pop} – заданное значение изменения численности населения в зонах подбора.

2.2. ОЦЕНКА КАЧЕСТВА ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ АВИАТРАНСПОРТНОЙ СИСТЕМЫ В ЦЕЛОМ

Основной целью подзадачи является получение числового значения оценки качества функционирования существующей или гипотетической АТС для пассажира по выбранной мере преодоления пространства (время, стоимость или расстояние). В дальнейшем данную оценку предлагается использовать в качестве граничных условий или в качестве оптимизируемого функционала в оптимизационной задаче определения требований к перспективной авиационной технике для сравнения состояний АТС при использовании альтернативных обликов воздушных судов.

При решении подзадачи учтено, что она должна позволять производить расчет качества АТС на основе информации о количестве рейсов между пунктами полета, а не между отдельными аэропортами авиаузла (если их больше одного), детальной статистики пассажиропотока между которыми не публикуется.

Тогда зона подбора пункта полета, соответствующего обособленному (не входящему в авиаузел) аэропорту, совпадает с зоной подбора этого аэропорта; зона подбора пункта полета, соответствующего авиационному узлу, является объединением зон подбора аэропортов узла. Численность населения $Pop_{ППр}$ и время подвоза $T_{подв,ППр}$ пункта полета определяются по формулам

$$(10) Pop_{ППр} = \sum_{j \in J(ППр)} Pop_{ап,j},$$

$$(11) T_{подв,ППр} = \frac{\sum_{j \in J(p)} T_{подв,j} Pop_{ап,j}}{\sum_{j \in J(p)} Pop_{ап,j}},$$

где $J(p)$ – подмножество аэропортов, соответствующих пункту полета p .

Аналогично формуле (11) для пунктов полета могут быть вычислены средние взвешенные по населению стоимость подвоза $S_{подв,ППр}$ и расстояние подвоза $d_{подв,ППр}$.

Для оценки качества используются оценки суммарных затрат на полное путешествие в АТС из зоны подбора одного пункта полета в зону подбора другого пункта полета выбранной меры преодоления пространства (времени, стоимости, расстояния).

В общем виде для произвольной меры преодоления пространства суммарные затраты могут быть записаны в виде

$$(12) C_{полн.|j_0,j_k} = C_{ПП_0} + \sum_{j_1, j_2 \in L} C_{ППj_1|j_2} + C_{авиаj_1,j_2} + C_{ППк},$$

где L – маршрут пассажира, состоящий из пар пунктов вылета (j_1) и прилета (j_2); $C_{ППj_1|j_2}$ – затраты в пункте полета j_1 при условии, что из него нужно вылететь в пункт полета j_2 (затраты на ожидание рейса); $C_{авиаj_1,j_2}$ – затраты на перелет между пунктами вылета (j_1) и прилета (j_2), зависящие от используемого типа воздушного судна; $C_{ПП_0}$ – затраты в начальном пункте маршрута, включая подвоз; $C_{ППк}$ – затраты в конечном пункте маршрута, включая подвоз.

Если в качестве меры преодоления пространства выбрано время, то временные затраты на полное путешествие пассажира в общем случае описываются формулой

$$(13) T_{\text{полн.}|j_0,j_k} = T_{\text{подв,ППо}} + \sum_{j_1,j_2 \in L} (T_{\text{ПП}|j_1|j_2} + T_{\text{авиа } j_1,j_2}) + T_{\text{ППк}} + T_{\text{подв,ППк}},$$

где $T_{\text{ПП}|j_1|j_2}$ – среднее время ожидания в пункте j_1 при условии, что из него нужно вылететь в пункте j_2 ; $T_{\text{ППк}}$ – время в конечном пункте маршрута (на получение багажа и выполнение формальностей); $T_{\text{авиа } j_1,j_2}$ – время перелета между пунктами вылета (j_1) и прилета (j_2), зависящее от используемого типа воздушного судна; $T_{\text{подв,ППо}}$ – среднее взвешенное время подвоза в начальном пункте маршрута; $T_{\text{подв,ППк}}$ – среднее взвешенное время подвоза в конечном пункте маршрута.

Наиболее сложным для определения слагаемым в формуле (13) является $T_{\text{ПП}|j_1|j_2}$. При известном расписании данное слагаемое легко находится. Однако расписания движения воздушных судов формируются каждой авиакомпанией в отдельности и в общем случае не синхронизированы между собой, что делает задачу определения гипотетического расписания весьма сложной.

Поскольку предлагаемая методика оценки качества АТС должна быть применима для оценки гипотетической АТС, было принято допущение о равномерном распределении количества рейсов в течение года и случайном характере спроса. Похожий подход к определению времени ожидания между рейсами применен, например, в [7]. Тогда среднее время ожидания в пункте полета можно найти по формуле

$$(14) T_{\text{ПП}|j_1|j_2} = \frac{24 \cdot 365}{2 \cdot N_{j_1|j_2}} + T_{\text{обсл},j_1},$$

где $N_{j_1|j_2}$ – количество рейсов в год между пунктами j_1 и j_2 ; $T_{\text{обсл},j_1}$ – время, необходимо на обслуживание в пункте j_1 (в случае первого пункте маршрута – это время регистрации на рейс, в случае промежуточных пунктов маршрута – время для пересадки).

В случае выбора стоимости в качестве меры преодоления пространства затраты на ожидание рейса в пункте j_1 при условии дальнейшего следования в пункт j_2 $S_{\text{ПП}|j_1|j_2}$ могут быть оценены через среднее время ожидания $T_{\text{ПП}|j_1|j_2}$ и среднюю часовую стоимость ожидания $S_{\text{ПП}|j_1}$:

$$(15) S_{ппj1|j2} = T_{ппj1|j2} S_{ппj1}.$$

Входными данными для проведения расчетов является таблица прямых связей M , полученная на основе данных о годовом количестве прямых рейсов между пунктами полета, содержащая следующие столбцы:

Начальный пункт полета $j1$ (пункт отправления).

Конечный пункт полета $j2$ (пункт прибытия).

Расстояние по ортодромии между пунктами полета $d_{j1,j2}$.

Среднее время перелета $T_{авиа j1,j2}$ из пункта $j1$ в пункт $j2$.

Средняя стоимость перелета $S_{авиа j1,j2}$ из пункта $j1$ в пункт $j2$.

Среднее время ожидания рейса $T_{j1|j2}$ в пункте $j1$ при условии дальнейшего полета в пункт $j2$.

Средняя часовая стоимость ожидания рейса $S_{ППj1|j2}$ в пункте $j1$ при условии дальнейшего полета в пункт $j2$.

Среднее взвешенное время подвоза по дороге $T_{подв,ППj1}$ в зоне подбора пункта $j1$.

Среднее взвешенное время подвоза по дороге $T_{подв,ППj2}$ в зоне подбора пункта $j2$.

Средняя взвешенная стоимость подвоза по дороге $S_{подв,ППj1}$ в зоне подбора пункта $j1$.

Средняя взвешенная стоимость подвоза по дороге $S_{подв,ППj2}$ в зоне подбора пункта $j2$.

Среднее взвешенное расстояние подвоза по дороге от населенного пункта до аэропорта $d_{подв,ППj1}$ в зоне подбора пункта полета $j1$.

Среднее взвешенное расстояние подвоза по дороге от населенного пункта до аэропорта $d_{подв,ППj2}$ в зоне подбора пункта полета $j2$.

Так как количество пунктов полета конечно, то для каждой пары начальных и конечных пунктов можно выбрать оптимальные маршруты по суммарному времени в пути, суммарной стоимости поездки или по суммарной длине маршрута. Для определения оптимальных маршрутов был разработан программный модуль, в котором реализован следующий алгоритм:

1. Выбирается критерий оптимальности маршрута $S_{полн. | j1,j2}$ (суммарное время, стоимость или расстояние на путешествие от двери до двери).

2. Количество пересадок $l = 0$. Таблица оптимальных маршрутов и их характеристик $U^{(0)}$ совпадает с таблицей прямых связей M , которая дополняется столбцом, содержащим количество пересадок (равное 0).

3. Количество пересадок $l = l + 1$. С учетом таблицы M по формулам (12), (13) вычисляется таблица параметров всех возможных маршрутов из конечных точек оптимальных маршрутов $U^{(l-1)}$, которые записываются в таблицу R_0 . $R_0 = U^{(l-1)} \bullet M$. При этом перечни столбцов R_0 и $U^{(l-1)}$ совпадают.

4. Формируется таблица R , состоящая из объединения строк таблиц $U^{(l-1)}$ и R_0 . $R = U^{(l-1)} \cup R_0$.

5. Из объединенной таблицы маршрутов R для каждой пары начальных и конечных пунктов полета, присутствующих в таблице, выбираются строки, обладающие минимальным значением выбранного в п.1 критерия. Эти строки образуют новое множество оптимальных маршрутов $U^{(l)} = \operatorname{argmin}_{\forall j_1, j_2 \in R} C_{\text{полн.}|j_1, j_2}(R)$

6. Шаги 3–5 алгоритма выполняются, пока количество оптимальных маршрутов продолжает увеличиваться.

В результате работы представленного выше алгоритма получается множество всех оптимальных маршрутов (по выбранному критерию), соединяющих все достижимые пункты сети между собой. При этом для каждого оптимального маршрута получены оценки суммарного времени, стоимости и расстояния.

На базе полученного по представленному выше алгоритму множества всех оптимальных маршрутов оценка качества АТС может быть найдена следующим образом:

1. Пункты полета упорядочиваются по убыванию численности населения в их зонах подбора.

2. Последовательно для групп из K крупнейших пунктов полета ($K = 2, \dots, n$) определяются:

2.1. перечень пунктов полета $J(K)$, образующих группу из K крупнейших пунктов полета;

2.2. доля численности населения, проживающего в зонах подбора этих K пунктов полета, относительно общей численности населения:

$$(16) dPop_K = \sum_{j \in J(K)} Pop_{\text{пп}j} / \sum_{j \in J(n)} Pop_{\text{пп}j};$$

2.3. максимальное из значений критерия на маршрутах из перечня оптимальных маршрутов между K пунктами полета $C_{max,K}$:

$$(17) C_{max,K} = \max_{j_1, j_2 \in J(K)} C_{полн. | j_1, j_2}.$$

Таким образом получается n пар значений $(dPop_K, C_{max,K})$, первое из которых соответствует доле от общей численности населения, а второе – гарантированному значению критерия, не превышая которое население зон подбора пунктов отправления и назначения может добраться друг до друга с учетом перелетов, ожиданий рейсов и подвоза, то есть «от двери до двери». Если в качестве критерия выбрано время, то гарантированное значение критерия – это время, не превышая которое данная доля населения может добираться друг до друга.

Отображая пары значений на декартовой плоскости, где по оси абсцисс отложена доля населения $dPop_K$, а по оси ординат – гарантированное значению критерия $C_{max,K}$, получим график убывающей функции $C(x)$, характеризующей качество АТС в целом.

На основе убывающей функции $C(x)$ могут быть построены числовые метрики q для количественной оценки качества АТС, к которой можно применить операцию сравнения и ввести отношение порядка. Это позволит оценивать изменение качества авиатранспортной системы при моделировании вариантов ее гипотетического облика: чем меньше значение q , тем лучше качество АТС.

В зависимости от задачи для нахождения метрики могут быть применены два следующих подхода:

1. По аналогии с подходом [28] фиксируется некоторая доля населения x_0 и в этой точке определяется значение функции $C(x)$:

$$(18) q_{точ} = C(x_0).$$

2. По аналогии с подходом из задач машинного обучения [26] для убывающей функции $C(x)$ можно найти площадь под графиком функции и сравнивать уже интегральные значения (19):

$$(19) q_{интегр} = \int_0^{x_0} C(x) dx.$$

Целесообразно использовать комбинацию указанных подходов ввиду следующих особенностей. Первый подход представля-

ется более наглядным, однако он не покажет различия, если улучшение критерия произошло только в левой части графика. Второй подход позволяет зафиксировать изменения показателя качества на всем промежутке значений $dPop_{ок}$. Значение интеграла соответствует среднему по населению значению критерия, однако не позволяет установить гарантированное значение для заданной доли населения и будет в большей степени отражать повышение качества сети за счет улучшений в пунктах с большой численностью населения.

3. Сбор данных для тестирования методического подхода и проведения моделирования

Описанный выше подход для своей реализации потребовал сбора в рамках настоящего исследования значительного массива данных о фактическом расположении населения, расположении аэропортов, времени в пути между объектами.

Для моделирования распределения населения по территории РФ были собраны данные о численности населения и географических координатах 19,8 тыс. сельских и городских муниципальных образований (поселениях) на территории России (см. рис. 1).



Рис. 1. Географическое расположение населенных пунктов РФ

Базу данных об аэропортах составили характеристики взлетно-посадочной полосы и географические координаты 853 существующих аэропортов, см. рис. 2.

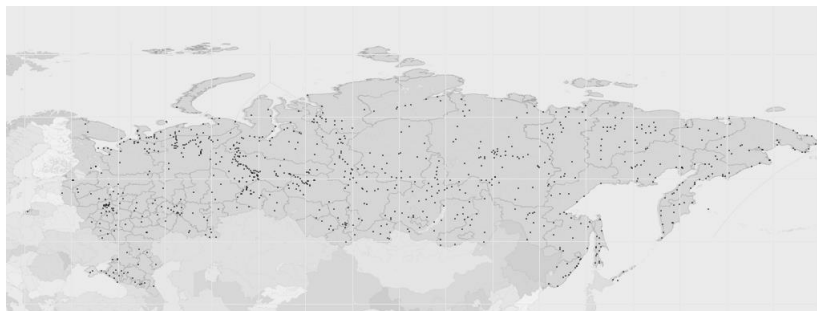


Рис. 2. Географическое расположение аэропортов на территории РФ

Сбор данных о протяженности и времени в пути по дороге между поселениями и аэропортами произведен с помощью программы на языке R, формирующей запрос к API маршрутизатора OpenStreetMap, который является некоммерческим картографическим проектом. По запросу, содержащему координаты двух точек, возвращается длина маршрута по дороге и продолжительность маршрута по дороге (с учетом ограничений скорости движения) между этими двумя точками. Всего было собрана информация о протяженности и продолжительности маршрутов для более чем 1 млн пар «поселение – аэропорт», которые были проложены по описываемой OpenStreetMap автодорожной сети, основные магистрали которой представлены на рис. 3.

В качестве данных о авиатранспортных участках маршрутов между населенными пунктами было использовано расписание 2021 года, доступ к которому предоставляет Центр расписания и тарифов АО «ТКП». Расписание включало авиасвязи между 269 аэропортами, из которых осуществлялись рейсы воздушных судов на внутренних воздушных линиях. Эти 269 аэропортов образуют 266 пунктов полета (4 аэропорта московского авиаузла относятся к пункту полета «Москва»). На основе расписания для каждой линии было определено количество рейсов в год.

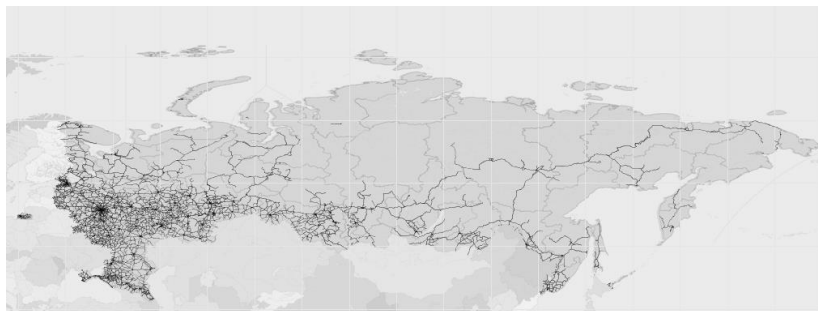


Рис. 3. Основные автомобильные дороги по данным ресурса OpenStreetMap

4. Тестирование методического подхода - результаты численного моделирования

В рамках тестирования предложенного подхода была решена прикладная задача – оценка потенциала изменения качества АТС для пассажира за счет появления на рынке региональных перевозок инновационных самолетов с электрической или гибридной силовой установкой вместо используемых в настоящее время газотурбинных самолетов. Оценка изменения характеристик АТС проводилась по критерию времени.

В рамках решения указанной задачи методом численного моделирования был получен облик АТС России в двух гипотетических сценариях, один из которых предполагает, а второй – не предполагает внедрения в эксплуатацию в АТС РФ перспективных самолетов. В сценарии внедрения перспективных самолетов предполагается следующее:

1. Развитие технологий «более электрического» самолета позволило создать летательные аппараты в классе местных и региональных самолетов пассажироместимостью в 2 раза меньше, чем у традиционных самолетов (местимостью до 60 мест), но с сопоставимым уровнем расходов на кресло-километр.

2. «Более электрические» самолеты применимы на дальностях до 1200 км. При паритете по затратам в 2 раза более вмести-

тельные самолеты предшествующих поколений замещены новыми, в результате чего в 2 раза увеличились частоты полетов на линиях применения региональных и местных самолетов.

На основе данных о географическом положении и численности населения в населенных пунктах, данных о расположении аэропортов и времени движения между населенными пунктами и аэропортами были найдены численности населения и среднее время подвоза в зонах подбора аэропортов. На рис. 4 представлен график изменения численности населения в зонах подвоза аэропортов, соответствующий левой части в формуле (9). Начиная с 1700 итерации сумма модулей изменения зон подбора аэропортов сокращается до менее чем 1 человека. С 4969-й итерации изменение становится равным нулю.



Рис. 4. Сумма модулей изменения численности населения в зонах подбора аэропортов

На следующем шаге получено распределение аэропортов и численности населения в их зонах подбора по среднему времени подвоза. В соответствии с представленными на рис. 5 результатами моделирования выявлено, что среднее время подвоза в 73% исследованных аэропортов РФ не превышает 3 часов.

Около 82% населения проживает в зонах подбора аэропортов со средним временем подвоза от 1 до 3 часов.

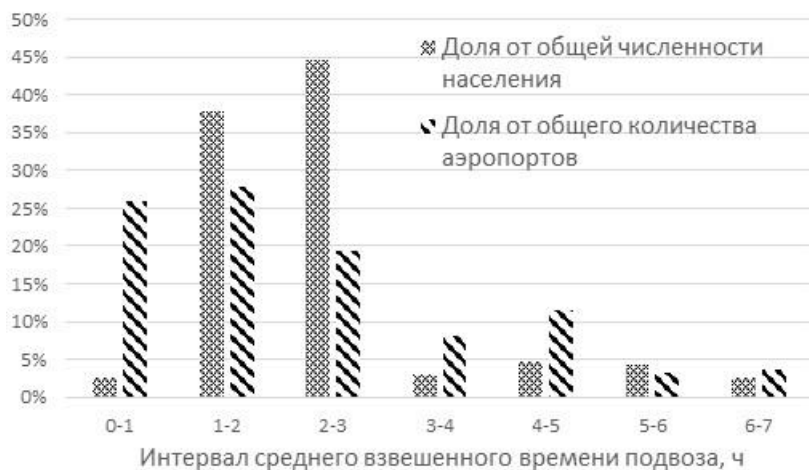


Рис. 5. Распределение численности населения в зонах подбора и количества аэропортов по среднему времени подвоза

Графики гарантированного времени от доли населения были рассчитаны по описанному выше алгоритму для случаев внедрения и отказа от использования инновационных типов региональных самолетов в АТС РФ (см. рис. 6). Их анализ показывает, что увеличение количества рейсов региональных самолетов практически не окажет влияния на сокращение времени в пути при использовании авиатранспорта для 86% населения. Данное обстоятельство объясняется тем, что это население проживает в зонах подбора наиболее крупных пунктов полета, для перевозок из которых самолеты исследуемой вместимости менее 60 кресел применяются ограниченно. Снижение расчетного времени начинает наблюдаться только начиная с доли населения 0,86, т.е. для 14% населения, проживающих в зонах подбора пунктов полета с наименьшими численностями населения.

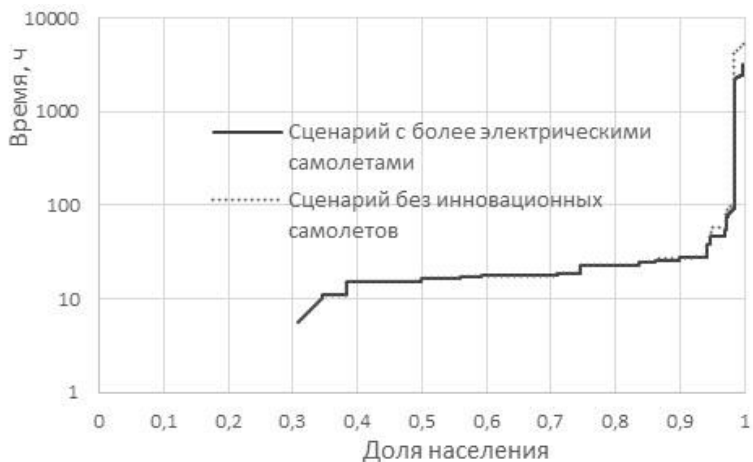


Рис. 6. Гарантированное время от доли населения

На рис. 7 представлены графики интегральной метрики $q(x_0)$, вычисленной по формуле (19) для двух сценариев, и их разницы.

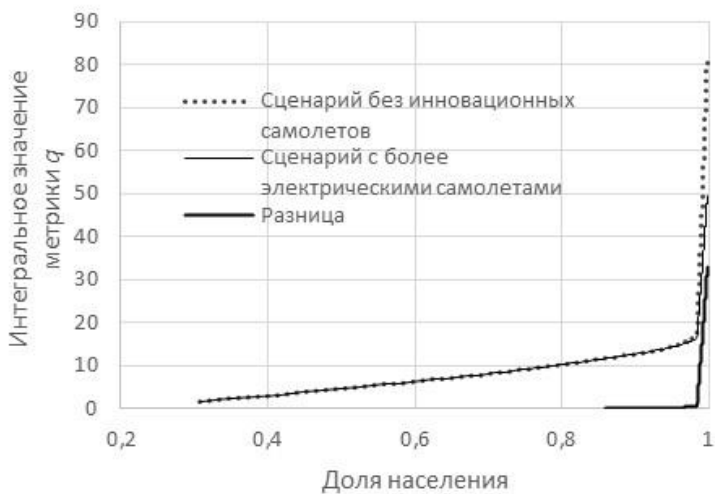


Рис. 7. Интегральная оценка качества q

Разница перестает быть нулевой начиная с доли населения 0,86. Наибольший рост разницы наблюдается начиная с доли населения 0,98. Для 2% населения, относящихся к пунктам полета с самыми малочисленными зонами подбора, увеличение количества рейсов даст улучшение интегральной оценки качества q . Как раз на маршруты с такими пунктами приходится основное применение самолетов, на которых в сценарии внедрения инновационных самолетов двукратно возросла частота рейсов.

Необходимо отметить, что значение интегральной метрики качества $q_{\text{интегр}}$ в точке 1 соответствует среднему взвешенному по населению значению критерия. Гипотетическое внедрение «более электрических» самолетов приводит к сокращению этого показателя с 81 до 50 часов.

Таким образом, с помощью предложенной в статье методики оценки качества АТС для пассажира получена количественная оценка эффекта от внедрения инновационного самолета размерности 30 и менее мест в российскую систему авиаперевозок. Установлено, что при внедрении инновационных типов самолетов значимое сокращение времени путешествия авиационным транспортом может быть получено для 2% населения РФ.

Продемонстрировано, что предлагаемый подход позволяет получить численную оценку качества функционирования АТС по выбранному критерию (в данном случае по критерию суммарного времени на путешествие «от двери до двери»).

5. Основные выводы

1. Обзор источников показал, что как в РФ, так и за рубежом в наиболее распространенных подходах к выбору требований к пассажирским самолетам недостаточно учитываются критерии, характеризующие качество АТС для пассажира, соответствующие требованиям, предъявляемым к перспективным АТС. Наиболее распространенные подходы к определению требований к перспективным воздушным судам основаны на оптимизации денежных потоков авиакомпаний (минимизации расходов на перевозки или максимизации прибыли авиакомпании). Тем самым доказана актуальность настоящей работы.

2. Представлено детальное изложение предлагаемой методики оценки качества АТС для пассажиров, применимой как для существующих, так и для гипотетических обликов АТС. Показано, что в отношении АТС РФ методика реализуема на доступном для приобретения или находящемся в свободном доступе массиве информации об объеме авиаперевозок пассажиров по направлениям, характеристиках аэродромной сети, численности проживающих в населенных пунктах, времени движения от населенных пунктов до аэропортов.

3. Продемонстрирована возможность автоматизации методики и сбора части исходных данных для ее реализации. Модуль расчета зон подбора аэропортов реализован на языке Python, модуль получения зависимости гарантированного значения критерия от доли населения – на языке R.

4. В ходе тестирования методики решена прикладная задача оценки приращения качества АТС для пассажира в гипотетическом сценарии замены современных региональных самолетов и самолетов местных линий на перспективные «более электрические» самолеты. Показано, что сокращение времени путешествия авиационным транспортом может быть получено для 14% населения, а в особенности – для 2% населения РФ, проживающих на территориях с малой численностью населения в зоне подбора аэропорта (как правило, удаленные и труднодоступные регионы).

5. Представлены рекомендации по использованию интегрального критерия качества АТС ($q_{\text{интегр}}$) при оценке изменения качества АТС в целом; точечных оценок качества АТС ($q_{\text{точ}}$) – при задачах, оперирующих ограничением вида «обеспечение для $m\%$ населения предельного времени в пути не более t часов».

6. Анализ результатов вычислительного эксперимента показал, что интегральная оценка качества авиатранспортной системы более полно показывает изменение качества авиатранспортной системы. В то же время использование точечных оценок качества интуитивно более понятно и позволяет задавать ограничения в формате требований, предъявляемых к перспективным АТС.

Литература

1. ГОРБУНОВ В.П. *Эволюция представлений о транспортной доступности* // Бюллетень транспортной информации. – 2019. – №8. – С. 10–14.
2. ДУБОВИК В.О. *Методы оценки транспортной доступности территории* // Региональные исследования. – 2013. – №4. – С. 11–18.
3. ДУТОВ А.В., КЛОЧКОВ В.В. *Методы оценки влияния технологий на характеристики перспективной продукции и достижение целей научно-технологического развития (на примере гражданского авиастроения)* // Экономика науки. – 2020. – Т. 6, №1-2.
4. ДУТОВ А.В., КЛОЧКОВ В.В., РОЖДЕСТВЕНСКАЯ С.М. *Измерение и нормирование транспортной связанности и качества транспортного обслуживания страны и ее регионов* // Россия: тенденции и перспективы развития. – 2019. – №14-2. – С. 43–48.
5. ЕГОШИН С.Ф., СМИРНОВ А.В. *Авиатранспортная доступность и транспортная дискриминация населения в субъектах Российской Федерации* // Научный вестник Московского государственного технического университета гражданской авиации. – 2018. – Т. 21. – №3.
6. КАРПОВ А.Е., КЛОЧКОВ В.В. *Моделирование и оптимизация системы регулярных местных воздушных перевозок с использованием скоростных винтокрылых летательных аппаратов* // Труды конференции «Управление развитием крупномасштабных систем MLSD'2020». – 2020. – С. 1220–1231.
7. КЛОЧКОВ В.В., РОЖДЕСТВЕНСКАЯ С.М., ФРИДЛЯНД А.А. *Обоснование приоритетных направлений развития авиационной техники для местных воздушных линий* // Научный вестник ГосНИИ ГА. – 2018. – №20. – С. 93–102.
8. МАЛАЩУК П.А. *Зарубежный опыт оценки транспортной доступности* // Актуальные проблемы, направления и механизмы развития производительных сил Севера-2018. – 2018. – С. 220–224.
9. МАНТУРОВ Д.В., КЛОЧКОВ В.В. *Методологические проблемы стратегического планирования развития российской*

- авиационной промышленности // Труды МАИ. – 2012. – №53. – С. 17.
10. РОЖДЕСТВЕНСКАЯ С.М., СЫПАЛО К.И. *Обоснование целей и приоритетных направлений научно-технологического развития авиационной промышленности* // Россия: тенденции и перспективы развития. – 2018. – №13-1.
 11. ALEXANDRE J. et al. *An innovative approach for integrated airline network and aircraft family optimization* // Chinese Journal of Aeronautics. – 2020. – Vol. 33, No. 2. – P. 634–663.
 12. BARON A. *Air transport efficiency and its measures* // Prace Instytutu Lotnictwa. – 2010. – No. 3(205). – P. 119–132.
 13. DZIKUS N.M. et al. *Market-driven Derivation of Field Performance Requirements for Conceptual Aircraft Design* // Aviation Technology, Integration, and Operations Conference – 2018. – P. 3499.
 14. EISENHUT D. et al. *Aircraft requirements for sustainable regional aviation* // Aerospace. – 2021. – Vol. 8, No. 3. – P. 61.
 15. FREGNANI J.A.T.G., DE MATTOS B.S., HERNANDES J.A. *Multidisciplinary and Multi-Objective Optimization Considering Aircraft Program Cost and Airline Network* // Journal of Air Transportation. – 2021. – Vol. 29, No. 1. – P. 27–41.
 16. FREGNANI J.A., MATTOS B.S., HERNANDES J.A. *An Innovative Approach for integrated Airline Network and Aircraft Family Optimization* // AIAA Aviation 2019 Forum. – 2019. – P. 2865.
 17. GEURS K.T., VAN WEE B. *Accessibility evaluation of land-use and transport strategies: review and research directions* // Journal of Transport geography. – 2004. – Vol. 12, No. 2. – P. 127–140.
 18. GRIMME W., MAERTENS S. *Flightpath 2050 revisited—An analysis of the 4-hour-goal using flight schedules and origin-destination passenger demand data* // Transportation Research Procedia. – 2019. – Vol. 43. – P. 147–155.
 19. HASAN Y.J., SACHS F. *Performance-based preliminary design and selection of aircraft configurations for unmanned cargo operations* // Automated Low-Altitude Air Delivery. – Springer, Cham, 2022. – P. 107–131.
 20. HOELZEN J. et al. *Hydrogen-powered aviation and its reliance on green hydrogen infrastructure—Review and research gaps* // Int. Journal of Hydrogen Energy. – 2021.

21. HUANG J. *Growth, Evolution and Scaling in Transport Networks* : PhD Thesis. – University of Leeds, 2015.
22. ROY S. et al. *Monolithic Approach for Next-Generation Aircraft Design Considering Airline Operations and Economics* // Journal of Aircraft. – 2019. – Vol. 56, No. 4. – P. 1565–1576.
23. SAIF M.A., ZEFREH M.M., TOROK A. *Public transport accessibility: a literature review* // Periodica Polytechnica Transportation Engineering. – 2019. – Vol. 47, No. 1. – P. 36–43.
24. SUN X., WANDELT S., HANSEN M. *Airport road access at planet scale using population grid and openstreetmap* // Networks and Spatial Economics. – 2020. – Vol. 20, No. 1. – P. 273–299.
25. WÖHLER S. et al. *Preliminary aircraft design for a midrange reference aircraft taking advanced technologies into account as part of the AVACON project for an entry into service in 2028.* – Deutsche Gesellschaft für Luft-und Raumfahrt-Lilienthal-Oberth eV, 2019.
26. YANG T., YING Y. *AUC maximization in the era of big data and AI: A survey* // ACM Computing Surveys (CSUR). – 2022.
27. YIA P., WANDELTA S., SUNA X. *Flightpath 2050 door-to-door travel time goal: A comparative study on Europe and China* // 8th Int. Conf. on Air Transport – INAIR 2019 GLOBAL TRENDS IN AVIATION.
28. <https://www.acare4europe.org/sria/flightpath-2050-goals> (дата обращения: 01.09.2021)
29. <https://www.faa.gov/sites/faa.gov/files/npias-2023-2027-narrative.pdf> (дата обращения: 15.12.2022).
30. <https://sacd.larc.nasa.gov/sacd/wp-content/uploads/sites/102/2021/04/2021-04-20-RAM.pdf> (дата обращения: 03.11.2021).

DEVELOPING THE AIR TRANSPORTATION SYSTEM QUALITY ASSESSMENT TOOLS TO DEFINE THE MAIN REQUIREMENTS FOR FUTURE AIRCRAFT

Andrey Vlasenko, Intersectoral analytical center, Moscow, Senior research officer (andrey.vlasenko84@gmail.com).

Alexey Sukharev, National Research University Higher School of Economics, Moscow, Postgraduate (alx.sukharev@gmail.com).

Ilya Uryupin, Federal Research Center "Computer Science and Control" of the Russian Academy of Sciences, Moscow, PhD, First category mathematician (uryupin93@yandex.ru).

Abstract: The aim of this article is to define and to describe the calculation methodology for both on-point and general quantitative indicators of air transportation system quality for a passenger. The indicators can be based on any of the three common measures of path-passing (time, cost, and distance). The pair of values that is proposed to be used as indicators is (1) a guaranteed value of the selected measure of path-passing defined for (2) a share of the population inside the air transportation system. As an application example the article describes the use of program module based on the proposed methodology to assess the potential benefits from the substitution of a Russia-based fleet of gas turbine powered regional aircraft with a fleet of "more electric" aircraft that have a twice less passenger capacity. The proposed indicators may be used as either optimization criteria or a boundary condition while developing the requirements for future civil aircraft.

Keywords: strategic planning, air transportation accessibility, quality evaluation of air transportation, mathematical modelling, guaranteed trip-time, advanced aircraft requirements.

УДК 656.7

ББК 39.58

DOI: 10.25728/ubs.2023.104.3

Статья представлена к публикации членом редакционной коллегии А.В. Горбуновой.

Поступила в редакцию 13.01.2023.

Опубликована 31.07.2023.