

МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ОРГАНИЗАЦИОННЫХ МЕХАНИЗМОВ ВНЕДРЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЙ ИНДИВИДУАЛЬНОГО МОНИТОРИНГА СОСТОЯНИЯ ИЗДЕЛИЙ АВИАЦИОННОЙ ТЕХНИКИ

Касаткин А. А.¹, Рахманина В. Е.²

*(ФГБУ «НИЦ «Институт имени Н.Е. Жуковского»,
Жуковский)*

Рассматривается согласование экономических интересов сторон, участвующих в техническом обслуживании и ремонте летательных аппаратов и их систем, при изменении подхода к их технической эксплуатации, обусловленного применением технологий индивидуального мониторинга состояния объектов авиационной техники. При внедрении таких технологий ожидается повышение долговечности продукции авиастроения и продление фактических сроков её эксплуатации. С экономической точки зрения это может стать причиной снижения прибыли разработчиков и производителей изделий авиационной техники, а также организаций, осуществляющих их техническое обслуживание и ремонт. В работе рассматриваются экономические механизмы внедрения данных технологий, позволяющие обеспечить их привлекательность как для вышеперечисленных организаций, так и для эксплуатантов. Так, определены взаимовыгодные диапазоны цен на модифицированную продукцию, предложен способ её реализации совместно с работами по техническому обслуживанию и ремонту в формате продажи эксплуатации летательных аппаратов по фиксированной ставке за лётный час. Проведено имитационное моделирование выполнения плановых полетов в нескольких регионах совместно с выполнением технического обслуживания и ремонта воздушных судов. Проведено сравнение затрат на выполнение полетов при различном эффекте от внедрения таких технологий при обеспечении качества оказания услуг. Показано, что при объединении нескольких эксплуатантов в пул с целью определения единой для всех эксплуатантов ставки продажи возможно предложить единую ставку продажи ниже, чем при обслуживании эксплуатантов по отдельности.

Ключевые слова: индивидуальный мониторинг состояния, согласование экономических интересов, единая ставка продажи.

¹ Андрей Алексеевич Касаткин, н.с. (kasatkinaa@nrczh.ru).

² Валерия Евгеньевна Рахманина, гл. специалист (rakhmaninave@nrczh.ru).

1. Введение

Воздушные суда – это сложные инженерные системы, состоящие из множества взаимосвязанных подсистем с возможными неопределенностями в их структуре. Они часто функционируют в течение длительного количества летных часов в изменяющихся или жестких условиях, поэтому прогнозирование и управление состоянием критических подсистем или компонентов в рамках общей системы имеет решающее значение для поддержания безопасности и надежности самолета [5]. Технологии индивидуального мониторинга состояния (ТИМС) объектов авиационной техники (АТ) позволяют отслеживать параметры состояния данного объекта, в частности, параметры, определяющие накопленные повреждения или выработку ресурса узлов и агрегатов. В состав системы мониторинга входят датчики измерения различных физических величин, бортовые блок-регистраторы и специальное программное обеспечение для обработки и анализа зарегистрированной датчиками информации. Системы мониторинга предназначены для регистрации в режиме реального времени нагрузок, действующих на конструкции, обнаружения повреждений, в том числе ударных, в контролируемых конструкциях, оценки предотказного состояния и остаточного ресурса [10, 22]. Первостепенной целью внедрения ТИМС является заблаговременное предотвращение отказа узлов и агрегатов каждого отдельного воздушного судна (ВС) [9, 14].

Ожидаемым эффектом от внедрения ТИМС объектов АТ является увеличение средних по парку временных интервалов между проведением различных форм технического обслуживания и ремонта (ТОиР), обусловленное выполнением ТОиР по факту накопления повреждений и/или достижения предотказного состояния соответствующих узлов и агрегатов, вместо выполнения ТОиР по факту наступления календарного срока или достижения соответствующего налёта [6, 19]. В работах [12, 18] рассматриваются подходы к оценке технического состояния АТ по показателям различных датчиков, фиксирующих ухудшения характеристик отдельных систем ВС. Таким образом, ТИМС

позволяют перейти от традиционной системы эксплуатации с едиными межремонтными и назначенными ресурсами для всего парка изделий данного типа к эксплуатации АТ по техническому состоянию [7, 13]. Следствием этого будет повышение готовности парка АТ и увеличение долговечности изделий (времени эксплуатации до списания), особенно при эксплуатации ВС в благоприятных условиях (при низком темпе накопления повреждений). Данной тематике посвящен ряд зарубежных работ [15, 17], в которых исследуется методология анализа затрат и выгод от применения технологий прогнозирования и управления состоянием АТ. Методология учитывает особенности эксплуатации коммерческих самолетов для получения оценок экономической целесообразности применения технологии на этих платформах.

Оптимизация технического обслуживания ВС – одна из приоритетных задач для каждой авиационной организации, так как расходы на ТОиР ВС составляют существенную долю операционных затрат авиакомпании [21]. В свою очередь и поставщики услуг ТОиР заинтересованы в снижении себестоимости предоставляемых услуг и увеличении собственной прибыли. Рассмотрим более подробно возможные эффекты при переходе к выполнению работ ТОиР по фактическому состоянию.

Эксплуатанты, проводящие мониторинг состояния объектов АТ и использующие его результаты для управления состоянием изделий АТ, при внедрении указанных технологий потенциально могут рассчитывать на экономическую выгоду

- от сокращения ожидаемых затрат на ТОиР, на замену и приобретение новых изделий (благодаря повышению их долговечности);
- от сокращения ожидаемых затрат при отказах изделий (благодаря повышению ожидаемой безотказности).

Описанное сокращение общей стоимости владения (затрат на приобретение парка ВС и затрат на ТОиР) является именно ожидаемым, носит вероятностно-статистический характер, а реальное изменение общей стоимости владения изделиями АТ в конкретном парке за конкретный рассматриваемый период является случайным и может отличаться от ожидаемого как

по абсолютной величине, так и по знаку, причем тем сильнее, чем короче рассматриваемый период и чем меньше численность и среднегодовой налет парка изделий в эксплуатации.

С другой стороны, эксплуатанты несут риски повышения издержек на покупку и ТО парка ВС ввиду повышения цен на АТ и дополнительных затрат на внедрение ТИМС. Они могут стать основанием для отказа от перехода к эксплуатации изделий АТ по техническому состоянию.

Разработчики и производители АТ также могут склоняться к отказу от внедрения ТИМС в свою продукцию. Повышение долговечности изделий, безусловно, является целесообразным: такая продукция становится более конкурентоспособной, так как выгодна эксплуатирующей организации. Однако повышение долговечности продукции требует от ее разработчика и изготовителя затрат (на разработку, внедрение конструктивных изменений и т.д.), что приведет к увеличению стоимости для эксплуатантов. Сокращение потребностей авиакомпаний на приобретение новых изделий и их ТОиР может привести к сокращению спроса на продукцию авиастроительных и ремонтных предприятий. Тем не менее в случае повышения себестоимости более качественной продукции можно предложить действенные организационные механизмы, обеспечивающие экономическую заинтересованность разработчиков и производителей АТ, а также организаций, осуществляющих её техническое обслуживание и ремонт во внедрении ТИМС [4].

В зарубежных работах, например [17, 20], также проводится анализ жизненного цикла использования прогностических систем в будущих или современных самолетах. Моделирование эксплуатации и технического обслуживания самолетов и расчёт возникающих затрат и доходов дает глубокую экономическую оценку эффектов внедрения технологий мониторинга состояния. В работах подчеркивается, что множество факторов влияет на то, будет ли внедрение ТИМС для конкретной системы в конечном итоге выгодным.

Таким образом, целью работы является разработка организационных механизмов согласования экономических интересов всех участников при внедрении ТИМС, формализация предло-

женных механизмов, анализ их эффективности и преимущественных условий их применимости.

2. Выработка организационных механизмов внедрения технологий индивидуального мониторинга состояния объектов АТ

В работе рассматриваются взаимодействующие стороны: авиакомпании, эксплуатирующие ВС (далее в тексте *эксплуатанты*), и организации-разработчики и изготовители изделий АТ, а также организации, осуществляющие ТОиР (для краткости далее в тексте *поставщики*).

Предполагается, что при внедрении ТИМС возможен общий выигрыш в экономической системе (включающей в себя поставщиков и эксплуатантов), поскольку средние сроки службы изделий АТ могут существенно возрастать – на десятки процентов или даже кратно [3, 18, 19]. Были проанализированы возможные способы перераспределения этого общего выигрыша взаимовыгодным для всех участников образом.

Одним из механизмов согласования экономических интересов организаций указанных типов может быть повышение цен на изделия АТ и услуги по их ТОиР в некотором взаимовыгодном диапазоне. Разработана математическая модель оценки границ такого диапазона, при которых одновременно не убывают прибыли поставщиков и не увеличиваются затраты эксплуатантов на приобретение парка АТ и ТОиР изделий АТ, с учетом увеличения среднего срока службы изделий АТ в парке благодаря внедрению таких технологий [8]. Описание модели приведено ниже.

Рассмотрим механизм договорного изменения цен с помощью экономико-математической модели на примере взаимодействия поставщика и единственной эксплуатирующей организации. Пусть предполагается увеличить периодичность выполнения ТОиР объектов АТ, ранее составлявшую T летных часов, на ΔT . Тогда при неизменном плане работы эксплуатирующей организации, использующей некоторое число ВС при суммарном налёте η летных часов за год, ожидаемый спрос на ремонт АТ

в течение года сокращается с $\frac{\eta}{T}$ заявок до $\frac{\eta}{T + \Delta T}$. Обозначим переменную c себестоимость ТО, а её изменение – Δc . Если при этом исходная цена ТО p изменилась на величину Δp , то годовая прибыль поставщика Π , ранее составлявшая

$$(1) \quad \Pi = (p - c) \frac{\eta}{T},$$

теперь составит

$$(2) \quad \Pi' = (p + \Delta p - c - \Delta c) \frac{\eta}{T + \Delta T}.$$

При этом годовые затраты эксплуатирующей организации на ТОиР ВС парка изменятся с

$$(3) \quad C_T = p \frac{\eta}{T}$$

до

$$(4) \quad C_T' = (p + \Delta p) \frac{\eta}{T + \Delta T}.$$

Достаточные условия взаимовыгодного увеличения периодичности ТО таковы:

- неубывание прибыли поставщика ($\Pi' \geq \Pi$);
- невозрастание затрат эксплуатирующей организации ($C_T' \leq C_T$).

Для этого должны выполняться следующие неравенства:

$$(5) \quad (p + \Delta p - c - \Delta c) \frac{\eta}{T + \Delta T} - (p - c) \frac{\eta}{T} \geq 0$$

и

$$(6) \quad (p + \Delta p) \frac{\eta}{T + \Delta T} - p \frac{\eta}{T} = \eta \frac{(p + \Delta p)T - p(T + \Delta T)}{T(T + \Delta T)} \leq 0.$$

Или после упрощения:

$$(7) \quad \Delta p \geq \Delta c + (p - c) \frac{\Delta T}{T}$$

и

$$(8) \quad \Delta p \leq p \frac{\Delta T}{T}.$$

Неравенства (5) и (7) представляют собой условия экономической эффективности для поставщика, а (6) и (8) – условия экономической эффективности для эксплуатирующей организации.

Следовательно, можно повысить цену на модифицированную продукцию так, чтобы обеим сторонам было выгодно, то есть в диапазоне

$$(9) \quad p \frac{\Delta T}{T} \geq \Delta p \geq \Delta c + (p - c) \frac{\Delta T}{T}.$$

Чем ближе контрактная цена к верхней границе указанного диапазона, тем больше относительный выигрыш поставщика; чем ближе к нижней границе, тем больше выигрыш эксплуатирующей организации. Заметим, что полученный выше диапазон допустимых изменений цен не должен быть пустым, что достигается только при справедливости неравенства $\frac{\Delta c}{c} \leq \frac{\Delta T}{T}$. Это

неравенство можно считать необходимым условием экономической заинтересованности всех сторон в разработке и внедрении таких технологий. Выбор пропорции распределения между поставщиками и эксплуатантами выгоды, обусловленной внедрением ТИМС, является предметом их договора и в данной работе не рассматривается.

Другим видом механизмов согласования экономических интересов организаций является заключение контрактов определенного типа, с помощью которых становится возможным распределение рисков и выгод между сторонами. Рассмотрим существующие виды контрактов по продаже услуг ТО и сферы их применения.

Продукция авиастроения включает в себя не только изделия АТ, но и различные виды их послепродажного обслуживания. Договоры о ТОиР между эксплуатантом и поставщиком могут предусматривать как традиционную оплату фактически проведенных работ и затраченных материалов (в зарубежной литературе – контракты типа ТАМ, Time and Materials), так и фиксированную ставку оплаты за летный час использования

ВС (в зарубежной литературе – контракты типа РВН, Power by the Hour) [16, 23].

Ввиду возможности отказов и повреждений элементов авиатехники фактические затраты на ТОиР представляют собой случайный поток. Заметим, что даже плановые затраты эксплуатирующей организации в связи с выработкой ресурса узлами и агрегатами АТ, хотя и могут быть определены заранее, в любом случае носят нерегулярный характер, что может в некоторые периоды заметно повышать потребность эксплуатанта в оборотных средствах [10]. Особенно существенной эта неравномерность может быть для небольших авиакомпаний. Поскольку в каждом конкретном случае объем потребных работ случаен, при контракте типа ТАМ затрудняется планирование денежных потоков, времени отхода ВС в ремонт и времени выхода из ремонта. Таким образом, контракт такого типа может быть сопряжен со значительными рисками как для эксплуатанта, так и для поставщика.

В свою очередь, контракт типа РВН предполагает, что поставщик ТОиР получает деньги не за выполненную работу по техобслуживанию, а за бесперебойное функционирование ВС или парка ВС. Поставщик получает фиксированные периодические выплаты за конкретное количество летных часов, выполненных ВС в течение определенного отрезка времени, и должен выполнять всю необходимую работу по техобслуживанию за свой счет вне зависимости от ее состава и стоимости. Преимущество этой схемы заключается в том, что организация-поставщик услуг ТОиР заинтересован в максимально эффективном выполнении работ, так как он принимает на себя большую часть рисков. Кроме того, оплата ТОиР по фиксированной ставке облегчает оценку лизинговых контрактов на приобретение АТ и снижает транзакционные издержки, особенно для небольших авиакомпаний, для которых эти издержки могут быть существенными.

Рассмотрим подробнее методы оценивания контрактов на ТОиР. Наиболее просты в оценке контракты типа ТАМ: требуется лишь определить цены запасных частей, материалов и ставки оплаты работ по замене или ремонту элементов изде-

лий АТ. Контракт типа РВН с теоретико-экономической точки зрения представляет собой пример страхования: исполнитель ТООР обязуется за фиксированную плату поддерживать ВС в состоянии, пригодном для использования по назначению, по мере необходимости выполняя работы по ТООР. Теория страхования хорошо разработана [11] и позволяет рассчитать приемлемый для обеих сторон уровень страхового взноса в зависимости от вероятностных характеристик риска (в данном случае – интервалов между ТО). Выплаты каждого эксплуатанта поставщику услуг ТООР, рассчитываемые по фиксированным ставкам за летный час, должны обеспечивать:

- возмещение поставщику ожидаемых затрат на ТООР образца АТ, принадлежащих данной эксплуатирующей организации;
- премию поставщику за принимаемый им риск изменения затрат на ТООР.

Поскольку страхование основано на законе больших чисел, контракты типа РВН целесообразно заключать именно крупным авиационно-техническим центрам (организациям по ТО), обслуживающим множество авиакомпаний. В то же время собственный парк изделий АТ и их комплектующих крупнейших авиакомпаний достаточно велик, чтобы внутри него произошли вероятностное усреднение и стабилизация потоков затрат на ТООР. Для таких эксплуатирующих организаций контракт типа РВН может оказаться невыгодным, поскольку он включает в себя премию за риск поставщику.

Таким образом, контракты типа РВН (в сравнении с контрактами типа ТАМ) рационально заключать между авиакомпаниями с малочисленными парками ВС и крупными организациями по ТО (обслуживающими десятки и более авиакомпаний).

3. Имитационное моделирование эксплуатации парка ВС при внедрении ТИМС

Для проверки применимости рассмотренных организационных механизмов было проведено имитационное моделирование эксплуатации парка ВС. В работе определяются характери-

стики выполнения пассажироперевозок гипотетическим парком ВС местных воздушных линий (МВЛ) при различном эффекте от ТИМС. Для решения поставленной задачи проведено моделирование выполнения пассажироперевозок МВЛ однотипным парком совместно с моделированием выполнения ТОиР парка. Задача состоит из следующих этапов:

- составление расписания полетов (при его отсутствии);
- описание процесса организации ТОиР ВС;
- моделирование выполнения полетов рассматриваемым парком;
- моделирование выполнения ТОиР ВС рассматриваемого парка;
- расчёт технико-экономических характеристик.

Исходными данными для составления расписания были сведения о пассажиропотоках МВЛ в регионе (Иркутская и Тюменская области, *регион 1* и *регион 2* далее в тексте соответственно), ожидаемая средняя загруженность борта, число дней в неделю, когда совершаются полеты, а также количество часов, в которые совершаются полеты в течение одного летного дня. Каждое ВС в расписании имеет рейсы только на одной линии. Все рейсы парные: *туда* и *обратно*. Исходя из потребного для перевозки всех пассажиров числа рейсов и существующих временных ограничений определялось потребное число ВС на каждой линии. При проведении исследования расписание полётов задано детерминированными значениями. Было сделано упрощающее предположение, что аэропорт, расположенный в региональном центре, является местом базирования всех ВС, выполняющих полеты в данном регионе.

Модель выполнения полетов представляет собой марковскую цепь. Исходными данными для моделирования выполнения полетов являются: расписание полетов, местоположение всех ВС, летно-технические характеристики ВС и состояние каждого ВС (готов к полетам или находится в ремонте). Моделирование проводилось последовательно для всех ВС. Сначала проверялось положение ВС: если оно совпадает с местом отправки, то рейс не отменяется, если нет – рейс добавлялся

в список рейсов, требующих замены планового ВС. Затем проверялось состояние ВС: если ВС находится в ремонте или не сможет выполнить рейс из-за наступления планового ремонта, или необходимость ремонта выявлена в ходе предполетной проверки (что относится в данной работе к «случайным отказам» или эксплуатации по фактическому состоянию, о чем речь пойдет дальше), тогда рейс добавлялся в список рейсов, требующих замены планового ВС. Заключительным этапом является проверка фактического налета ВС с ресурсом на списание: если соответствующий налет достигнут, то данное ВС переходит в категорию *списанных*, оно более не совершает полеты, все его последующие рейсы переходят в категорию «требующие замены планового ВС», закупка новых ВС вместо списанных в данной работе не рассматривалась. Если все данные проверки были пройдены, то рейс выполнялся, налет ВС увеличивался на соответствующее число часов, положение ВС менялось на место назначения.

После выполнения всех рейсов за день составлялось расписание всех отмененных рейсов, оно дополнялось транзитными рейсами из аэропорта базирования, если отменялись рейсы из *периферийного аэропорта в региональный центр*. Далее эти рейсы распределялись между ВС региона, не имеющими плановых рейсов в соответствующее время. После чего проводилось моделирование выполнения замен отмененных рейсов аналогично выполнению плановых рейсов с тем отличием, что замены выполнялись ВС, отличными от планового ВС для данного рейса, свободными от плановых рейсов и готовыми к полетам в соответствующее время.

При моделировании эксплуатации парка ВС в части организации технического обслуживания и ремонта рассматривались пять форм ТОиР, имеющих периодичность и стоимость $\{\tau_i, c_i\}$ каждой i -й формы ТОиР ($i = 1, \dots, 5$), а также случайный отказ, требующий кратковременного ремонта продолжительностью τ_0 и стоимостью c_0 . Считалось, что работы по всем формам ТОиР выполняются централизованно на сервисной инфраструктуре (для их выполнения требуется перелет из *периферийного аэропорта в региональный центр*, откуда уже ВС отправляются

на сервисную инфраструктуру), случайные отказы могут быть устранены силами технических служб аэропорта в месте их фактического пребывания. Продолжительности выполнения работ различных форм τ_i представлены в таблице 1. Выбранные данные для описания процесса выполнения работ по ТОиР являются достаточными для демонстрации примера расчета и для формирования качественных выводов о влиянии внедрения ТИМС на характеристики выполнения парком ВС пассажирских перевозок.

Таблица 1. Продолжительность выполнения рассматриваемых форм ТОиР (ч)

Случайный отказ	A-check	B-check	C-check	D-check	E-check
τ_0	τ_1	τ_2	τ_3	τ_4	τ_5
24	48	72	96	120	240

Стоимости выполнения ремонтных работ различных форм c_i приняты следующими (см. таблицу 2).

Таблица 2. Стоимость выполнения рассматриваемых форм ТОиР (тыс. руб.)

Случайный отказ	A-check	B-check	C-check	D-check	E-check
c_0	c_1	c_2	c_3	c_4	c_5
20	50	200	1200	8000	50000

Составление модельного расписания полетов, моделирование полетов рассматриваемым парком и моделирование выполнения ТОиР ВС рассматриваемого парка аналогичны таковым в работе [2], где данные этапы описаны более подробно.

В работе рассматриваются сценарии, когда внедрение ТИМС приводит к возможности перевода всех форм ТОиР на выполнение по фактическому состоянию, совместно со случаем, когда выполнение наиболее трудоемких форм ТОиР (D-check, E-check) остается привязанным к назначаемым фиксированным наработкам.

При различных условиях эксплуатации в разных регионах темпы накопления повреждений и наработки могут быть различными. Соответственно, ожидаемый эффект от внедрения ТИМС подразумевает также различные сценарии:

- Технологии индивидуального мониторинга не внедрены, все формы ТОиР выполняются по единой для всего парка межремонтной наработке, назначаемой разработчиком, обозначаются «без ТИМС».

- Внедрение технологий индивидуального мониторинга состояния не приводит к увеличению средней наработки, обозначаются «+0%». Такие сценарии характерны для неблагоприятных условий эксплуатации (при высоком темпе накопления повреждений).

- Внедрение технологий индивидуального мониторинга состояния приводит к увеличению средней межремонтной наработки на 20%, 50% и 100%, обозначаются «+20%», «+50%» и «+100%» соответственно. Такие сценарии могут реализоваться в благоприятных условиях эксплуатации.

При выполнении ТОиР в соответствии с назначенными наработками моменты возникновения необходимости выполнения каждой формы равномерно распределены по летным часам. При внедрении ТИМС моменты возникновения необходимости выполнения ТОиР случайны и имеют распределение Пуассона с заданным математическим ожиданием ($1/T_i$ для i -й формы). Периодичности выполнения ремонтов и различных форм ТОиР T_i для различных сценариев условий эксплуатации ВС представлены в таблице 3 [1]. Во всех сценариях технической эксплуатации моменты возникновения случайных отказов имели распределение Пуассона.

В силу ограниченности набора доступных исходных данных и значительной трудоемкости построения имитационной модели функционирования самих ТИМС объектов АТ была построена вероятностная имитационная модель, в которой эффект от внедрения таких технологий является экзогенным по отношению к параметрам модели.

Таблица 3. Периодичность выполнения рассматриваемых форм ТОиР (ч)

	T_0	T_1	T_2	T_3	T_4	T_5
Без ТИМС	300	150	500	1000	2000	3000
+0%	300	150	500	1000	2000	3000
+20%	360	180	600	1200	2400	3600
+50%	450	225	750	1500	3000	4500
+100%	600	300	1000	2000	4000	6000

В работе рассматриваются два варианта начального состояния ВС: новые, без начального налета (обозначено «одновозрастный парк»), и ВС, начальные налеты которых составляют 0 ч, 2500 ч, 5000 ч, в одинаковой пропорции распределенные по численности парка, выполняющего полеты в регионе («разно-возрастный парк»).

В данной работе проводится сравнение экономических характеристик выполнения заданной транспортной работы с обеспечением коэффициента готовности парка не ниже 0,99, исходя из чего предварительно определялось число запасных ВС каждого вида.

Выполнение замен отмененных рейсов авиакомпания может производиться за счет имеющихся у нее ВС, выполняющих плановые рейсы (N_{BC_i} , индекс i относится к конкретному эксплуатанту), и за счет имеющихся в ее распоряжении запасных ВС (ΔN_{BC_i}), необходимых для обеспечения бесперебойной работы авиапарка.

Также рассматриваются случаи, в которых авиакомпания-эксплуатанты объединяются в общий «пул» с целью определения единой для всех эксплуатантов ставки продажи. При этом рассматривается возможность предоставления *общих* запасных ВС (в числе N_p) всем эксплуатантам, объединенным в «пул», по запросу на время выполнения «тяжелых» форм ТОиР (D-check, E-check).

Регионы-эксплуатанты подают заявку на предоставление им запасного ВС из общего «пула» в случае, когда один из их ВС встает на «тяжелую» форму ТОиР. Поставщик услуг ТОиР

собирает данные заявки со всех эксплуатантов, фиксируя моменты времени подачи заявки. По окончании полетного дня все заявки сортируются по следующему принципу: 1-я заявка из первого региона, 1-я заявка из второго региона, 1-я заявка из третьего региона, 2-я заявка из первого региона и т.д. После сортировки заявок поставщик услуг ТООР передает имеющиеся у него в данный момент нераспределенные ВС из общего «пула» запасных верхним в отсортированном списке заявок регионам. По окончании выполнения тяжелой формы ТООР ВС, которое было заменено запасным из общего «пула», запасное ВС из общего «пула» возвращается поставщику услуг.

4. Результаты имитационного моделирования эксплуатации парков ВС при внедрении ТИМС

В результате моделирования выполнения пассажироперевозок МВЛ однотипным парком определяются:

- налет каждого ВС и совершенная транспортная работа за рассматриваемый период времени;
- перечень выполненных форм ТООР за рассматриваемый отрезок времени;
- готовность парка за рассматриваемый отрезок времени;

Во всех рассмотренных случаях считается, что ВС имеют одни и те же летно-технические характеристики, сравниваются затраты при выполнении пассажироперевозок в одних и тех же регионах с неизменным расписанием плановых полетов.

В результате обработки результатов имитационного моделирования работы эксплуатантов получены следующие параметры, осредненные по 20 реализациям:

- Количество отказов и операций ТООР каждой формы N_i для рассматриваемого авиапарка в течение рассматриваемого периода T .
- Средний по реализациям суммарный налет всех ВС авиапарка η .

С помощью полученных данных рассчитывались следующие экономические показатели:

- Прямые расходы на выполнение работ по ТОиР:

$$(10) C_T = \sum_{i=1}^n c_i N_i,$$

где c_i – стоимость проведения ремонта или ТОиР i -й формы, представлены в таблице 2; N_i – число ремонтов или ТОиР i -й формы; n – число различных ремонтов и форм ТОиР.

- Затраты на лизинг ВС авиапарка:

$$(11) C_{\text{Л}} = C_{\text{ВС}} N_{\text{ВС}} \frac{\eta}{\text{term} \cdot N_{\text{ВС}}} = C_{\text{ВС}} \frac{\eta}{\text{term}},$$

где $C_{\text{ВС}}$ – стоимость ВС; $N_{\text{ВС}}$ – численность парка; η – суммарный налёт парка ВС; term – проектный срок службы до списания одного ВС.

- Суммарные средние (по реализациям) затраты на содержания авиапарка:

$$(12) \overline{COST} = \overline{C_{\text{Л}}} + \overline{C_{\text{Т}}},$$

где $\overline{C_{\text{Л}}}$ – средние по реализациям затраты на лизинг; $\overline{C_{\text{Т}}}$ – средние по реализациям затраты на ТОиР.

Прежде чем перейти к рассмотрению экономических аспектов внедрения ТИМС, продемонстрируем, как проявляется положительный эффект от внедрения данных технологий в натуральных величинах, а именно, как снижается доля ВС авиапарка, одновременно находящихся в ремонте.

Было проведено моделирование выполнения полетов авиапарками одинаковой численности без ТИМС и с внедрением данных технологий при различном эффекте от внедрения. В результате проведенного моделирования на конец каждого полётного дня рассматриваемого периода была получена информация о числе ВС, находящихся в ремонте. Для проверки эффекта внедрения ТИМС данная величина была отнесена к числу ВС авиапарка, тем самым были вычислены доли парка, находящиеся в ремонте к концу полётного дня. На рис. 1 представлено сравнение долей для двух сценариев эксплуатации парка: без ТИМС и с внедрением ТИМС в неблагоприятных условиях эксплуатации, когда средние наработки на форму ТОиР не возрас-

тают (число запасных ВС одинаково во всех случаях на рис. 1 и 2).

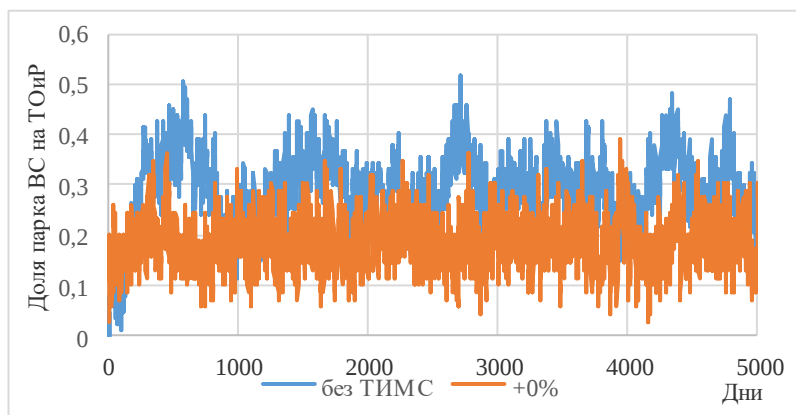


Рис. 1. Снижение доли парка ВС, одновременно находящихся в ремонте, при внедрении ТИМС

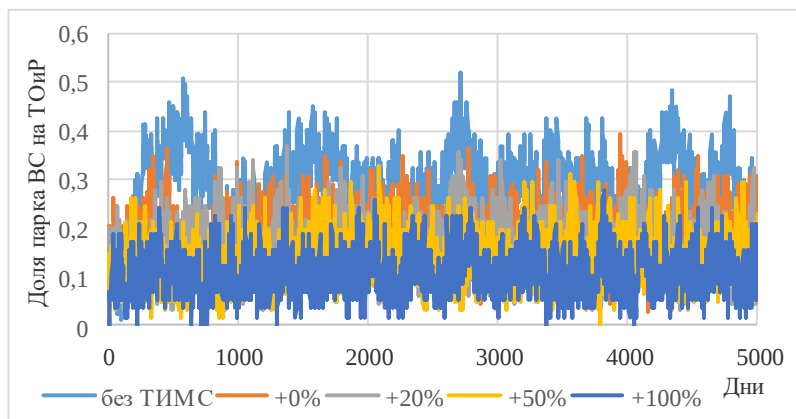


Рис. 2. Сравнение долей парка, одновременно находящихся в ремонте, при различном эффекте от внедрения ТИМС

Даже при эксплуатации парка ВС в неблагоприятных условиях (+0%) внедрение ТИМС приводит к снижению требуемого

числа запасных ВС, так как различные ВС реже одновременно выполняют ТОиР, как было при эксплуатации по регламенту при одинаковой интенсивности эксплуатации парка.

Если же рассмотреть сценарии увеличения межремонтной наработки на 20%, 50% и 100% (благодаря внедрению ТИМС), то можно отметить существенное уменьшение числа «пиковых» ситуаций (рис. 2), когда большое количество ВС одновременно выходит на ремонт, при этом доля парка ВС, одновременно находящихся в ремонте, также снижается.

4.1. МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭКСПЛУАТАЦИИ АВИАПАРКА НА ДОЛГОСРОЧНОМ ПЕРИОДЕ

При рассмотрении долгосрочного периода считалось, что только тяжёлые формы ТОиР – D-check и E-check – производятся согласно Программе ТО, все оставшиеся формы вследствие внедрения ТИМС производятся по фактическому состоянию. Рассмотрим пример эксплуатанта, который приобретает в лизинг парк ВС на период $T = 20$ лет (контракт типа ТАМ).

Для эксплуатанта (регион 1), в расписании которого плановые рейсы могут выполняться одиннадцатью ВС, рассчитаны фактические стоимости операций ТОиР в течение рассматриваемого периода для различных сценариев технической эксплуатации (без ТИМС, +0%, +20% и т.д.) (см. рис. 3).

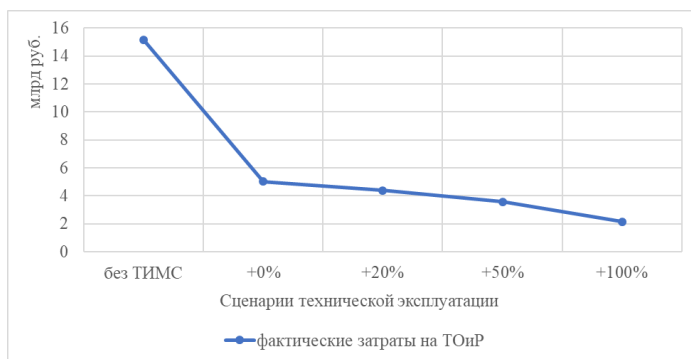


Рис. 3. Сравнение фактических затрат на ТОиР при различном эффекте от внедрения ТИМС

При этом для сценария «без ТИМС» фактические затраты на ТОиР кратно превышают соответствующие затраты для сценария +0%. Это обусловлено проблемой «переноса ремонта», в данном случае для текущего эксплуатанта, а не для последующего. В данном случае эксплуатантом было оплачено большое количество тяжёлых форм ТОиР, после чего истёк период эксплуатации, и парк ВС перешёл в пользование к другому эксплуатанту (см. рис. 4).



Рис. 4. Иллюстрация непропорциональности длительности контракта и количества выполненных тяжёлых форм ТОиР

Для того чтобы корректно рассчитывать затраты эксплуатанта на операции ТОиР (без вышеописанных «краевых» эффектов) на долгосрочном периоде эксплуатации предлагается устанавливать оплату плановых операций тяжёлых форм ТОиР не на основе фактически выполненных за период планирования работ, а на основе доли ресурса элементов ВС, исчерпанной за период планирования данной эксплуатирующей организацией (так называемая амортизация ТОиР). Так сумма затрат на тяжёлые формы ТОиР равномерно распределяется на весь календарный срок службы. Рис. 5 иллюстрирует разницу в подходах расчёта стоимости ТОиР. Далее при моделировании на долгосрочном периоде везде производится амортизация стоимости тяжёлых форм ТОиР.

На рис. 6 представлена детальная структура затрат на каждую форму ТОиР при различном эффекте от внедрения ТИМС.

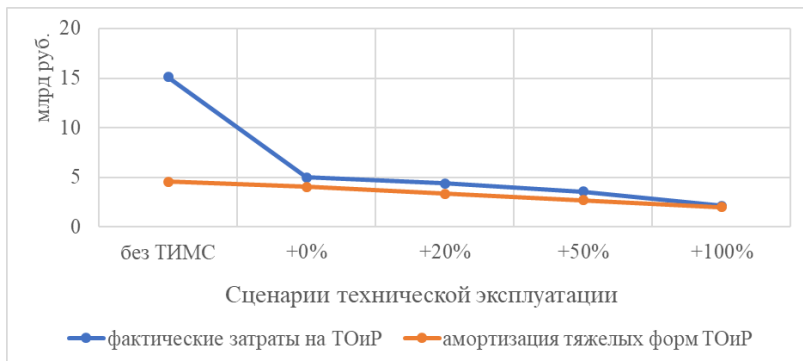


Рис. 5. Эффект амортизации тяжёлых форм ТОиР
(контракт на 20 лет)

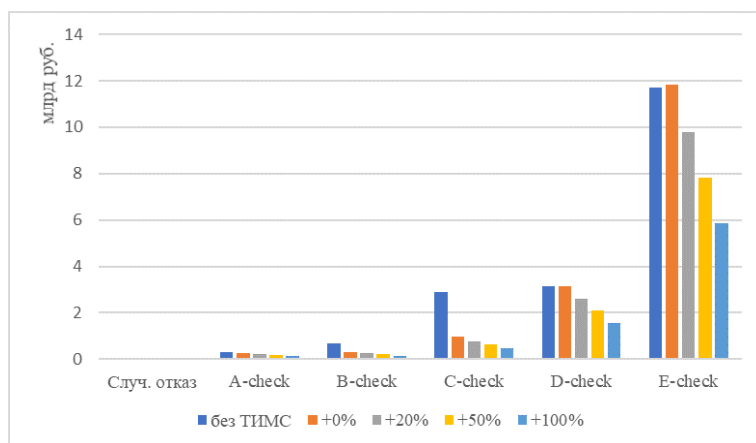


Рис. 6. Сравнение затрат на ТОиР при различном эффекте
от внедрения ТИМС (контракт на 20 лет)

Можно отметить существенное снижение затрат на выполнение *легких* форм ТОиР при переходе от «без ТИМС» к «+0%», что свидетельствует о том, что назначенные регламентные сроки выполнения соответствующих форм определены с заведомо избыточными запасами.

Возвращаясь к другой категории затрат (лизинговые издержки по приобретению необходимого количества ВС, в том числе и запасных), отметим, что снижение частоты производимых операций ТОиР приводит к уменьшению доли ВС, находящихся в ремонте и, соответственно, к снижению потребного числа запасных ВС (см. рис. 7).

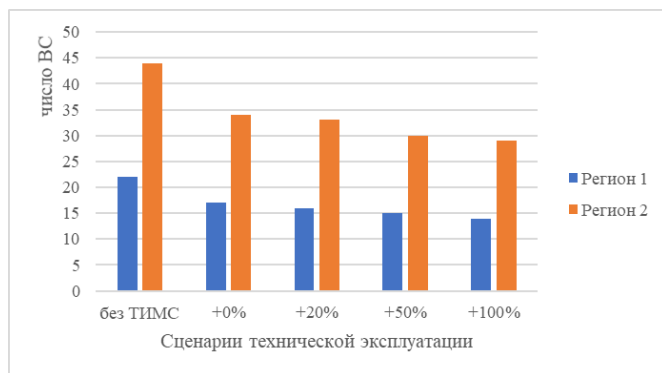


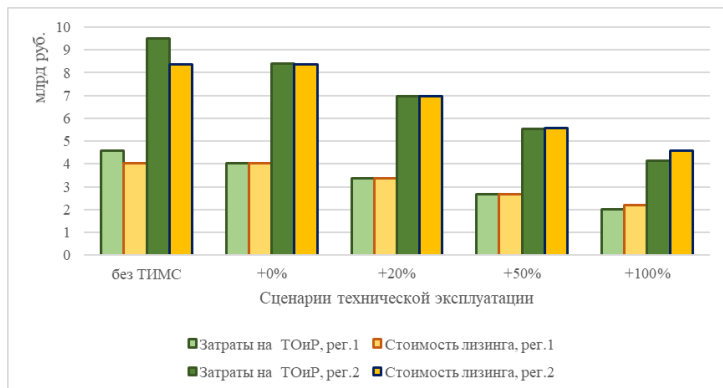
Рис. 7. Численность парка ВС эксплуатантов включая штатные и запасные ВС (контракт на 20 лет)

Таким образом, уменьшение суммарных издержек происходит за счёт снижения затрат на ТОиР и на содержание запасных ВС. На рис. 8 представлены значения затрат двух эксплуатантов (регион 1 – 11 ВС, регион 2 – 24 ВС в эксплуатируемом парке) при различных сценариях увеличения межремонтной наработки при внедрении ТИМС по сравнению с исходным сценарием.

Для обоих регионов можно отметить более высокий темп убывания издержек на оплату ТОиР в связи с увеличением межремонтной наработки объектов АТ по сравнению с темпом уменьшения лизинговых затрат.

Стоит также отметить, что в случае, если внедрение ТИМС не приводит к существенному увеличению средней межремонтной наработки, затраты на ТОиР, тем не менее, сокращаются: для сценария +0% одинаково в обоих регионах произошло уменьшение затрат на ТОиР на 11,5%. В случае двукратного

увеличения межремонтной наработки (сценарий +100%) возможно снижение затрат на ТОиР до 56% в каждом из регионов, при этом затраты на лизинг сократятся на 45%.



*Рис. 8. Издержки эксплуатантов на содержание авиапарка
(контракт на 20 лет)*

Было проведено сравнение затрат на ТОиР для одновозрастного и разновозрастного парков ВС (см. таблицу 4).

Таблица 4. Сравнение затрат на содержание авиапарков с различным исходным налётом входящих в него ВС (контракт на 20 лет)

	Затраты на ТОиР, $\overline{C_T}$, млрд руб.	
	Одновозрастный парк	Разновозрастный парк
без ТИМС	4,56	4,61
+0%	4,04	4,04
+20%	3,36	3,36
+50%	2,68	2,68
+100%	2,01	2,00

В рассмотренном случае, когда начальный налет мал в сравнении со средним ресурсом и средним сроком службы, он не имеет существенного влияния на суммарные затраты

на ТОиР. Далее в тексте везде приведены результаты для разновозрастных парков.

Рассмотрим экономические аспекты внедрения ТИМС с позиции поставщика. В первую очередь разработка и внедрение ТИМС требует от поставщика дополнительных затрат FC . Если не изменятся цены c_i , по которым производитель будет осуществлять операции ТОиР, то прибыль производителя от ТОиР снизится вследствие того, что увеличится средняя периодичность ремонтов за период T ($\overline{C'_T} < \overline{C_T}$). За счёт увеличения надёжности и долговечности ВС эксплуатантам будет необходимо меньшее число запасных ВС $\Delta N'_{BC_i} < \Delta N_{BC_i}$, вследствие чего затраты на лизинг сократятся до величины $\overline{C'_L} < \overline{C_L}$, что, как показано выше, выгодно эксплуатанту. Таким образом, при внедрении ТИМС ожидается снижение суммарных затрат на содержание авиапарка:

$$(13) \overline{COST}' = \overline{C'_L} + \overline{C'_T} < \overline{COST}.$$

Пусть прибыль поставщика в базовом сценарии (без ТИМС) составляет 10% от затрат на содержание авиапарка:

$$(14) R_{\text{пост}} = 0,1 \cdot \overline{COST} = 0,1 \cdot (\overline{C_L} + \overline{C_T}).$$

При этих условиях затраты эксплуатанта в базовом сценарии составят

$$(15) EXP = \overline{COST} + R_{\text{пост}}.$$

При переходе к эксплуатации по состоянию поставщик несет издержки FC на разработку и внедрение ТИМС АТ. При оценке минимального значения данной величины прибыль поставщика $R_{\text{пост}}$ считается неизменной:

$$(16) EXP' = \overline{COST}' + R_{\text{пост}} + FC.$$

Несмотря на появление нового слагаемого, при определённых сценариях существует возможность сокращения суммарных затрат эксплуатанта за счёт существенного снижения стоимости содержания авиапарка $\overline{COST}'$.

Для оценки максимально возможной прибыли поставщика $R'_{\text{пост}}$ необходимо при сохранении прежнего уровня затрат эксплуатанта рассмотреть их разность с новыми затратами на содержание авиапарка вместе затратами на внедрение и разработку ТИМС:

$$(17) R'_{\text{пост}} = EXP - \overline{COST'} - FC.$$

Условия, при которых и эксплуатанту, и поставщику выгодно внедрение ТИМС, являются следующими:

$$(18) \begin{cases} R'_{\text{пост}} \geq R_{\text{пост}}, \\ EXP' \leq EXP. \end{cases}$$

Данные неравенства отражают идею о существовании взаимовыгодного диапазона цен, описываемого формулами (7)–(9). Для возможности сравнения результатов имитационного моделирования для различных сценариев и регионов введём также удельный параметр – ставку эксплуатации C_{exp} , отражающий ожидаемые средние затраты на содержание авиапарка за период T в расчёте на лётный час, вычисляемые как отношение суммарных затрат эксплуатанта к количеству совершенных лётных часов η за рассматриваемый период времени:

$$(19) C_{\text{exp}} = \left(\frac{EXP'}{\eta} \right) = \left(\frac{COST' + R_{\text{пост}} + FC}{\eta} \right).$$

Минимальная ставка эксплуатации при переходе на сценарии с ТИМС реализуется при сохранении прибыли поставщика на прежнем уровне. Если поставщик желает повысить прибыль (и если этому не противоречит условие невозрастания затрат эксплуатанта по сравнению с базовым сценарием), то поставщик может назначать ставку эксплуатации выше минимальной.

Для определения взаимовыгодного диапазона цен были рассмотрены следующие граничные случаи:

- Прибыль поставщика остается неизменной, а затраты эксплуатанта сокращаются:

$$(20) \begin{cases} R_{\text{пост}} = \text{const}, \\ EXP' \leq EXP. \end{cases}$$

- Уровень затрат эксплуатантов сохраняется равным первоначальному, при этом прибыль поставщика растёт:

$$(21) \begin{cases} EXP = const, \\ R'_{\text{ПОСТ}} \geq R_{\text{ПОСТ}}. \end{cases}$$

Тем самым определяются «коридоры» взаимовыгодных цен для обоих участников (см. таблицу 5).

Таблица 5. Взаимовыгодные диапазоны изменения прибыли поставщика и затрат эксплуатанта (контракт на 20 лет, разновозрастной парк)

Сценарий	Сохранение прибыли поставщика			Сохранение затрат эксплуатантов		
	$R_{\text{ПОСТ}min}$, млрд руб	EXP'_{min} , млрд руб	$C_{exp min}$, руб	$R'_{\text{ПОСТ}max}$, млрд руб	EXP_{max} , млрд руб	$C_{exp max}$, руб
без ТИМС	3,53	36,45	46 485	5,85	38,69	49 452
+0%	3,53	30,89	39 502	11,41	38,69	49 591
+50%	3,53	25,36	32 510	16,94	38,69	49 710
+100%	3,53	20,68	26 571	21,62	38,69	49 710

Отразим коридоры значений, соответствующих условиям (20) и (21), на графике (см. рис. 9):

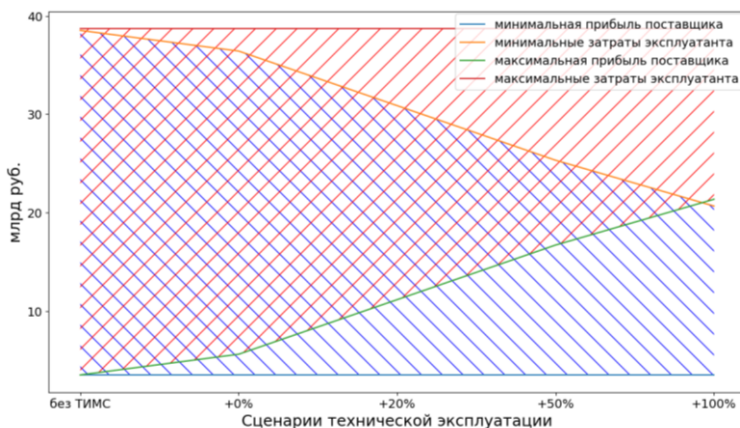


Рис. 9. Взаимовыгодные диапазоны изменения прибыли поставщика и затрат эксплуатанта (контракт на 20 лет)

На рисунке красной штриховкой выделен взаимовыгодный диапазон цен при сохранении затрат авиакомпаний на прежнем уровне (так, поставщик может получить ощутимый выигрыш в прибыли, особенно если при внедрении ТИМС произойдет существенное повышение межремонтной наработки (сценарии +50%, +100%). Синей штриховкой выделен диапазон при сохранении прибыли поставщика: тогда затраты авиакомпании удастся снизить до 45% при максимальном увеличении межремонтной наработки.

Необходимо также провести параметризацию в зависимости от предполагаемых затрат FC . Рассмотрим значения $FC = 2$ млрд, 4 млрд, 6 млрд руб. На рис. 10 представлены значения ставки эксплуатации C_{exp} для различных сценариев внедрения ТИМС при различной стоимости их разработки и внедрения.

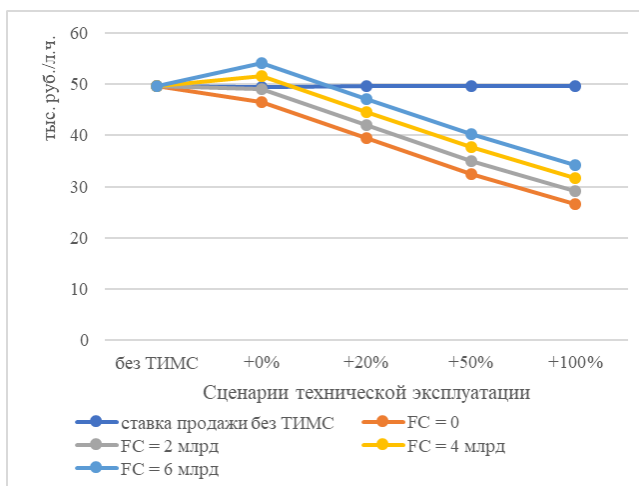


Рис. 10. Диапазоны изменения ставки эксплуатации при различной стоимости разработки и внедрения ТИМС (контракт на 20 лет)

Максимальная ставка эксплуатации для исходного сценария без ТИМС обозначена синей линией. Те случаи, когда став-

ка выше, свидетельствуют о нецелесообразности внедрения ТИМС, так как затраты на их разработку и внедрение не приносят экономической выгоды эксплуатантам (если не происходит увеличения межремонтной наработки, сценарий +0%). В сценариях с увеличением межремонтной наработки на 20% и выше внедрение ТИМС становится выгодным при всех рассмотренных значениях FC .

Со стороны поставщика ситуация аналогична: если рассматривать фиксированные максимальные затраты эксплуатантов по сравнению со сценарием без ТИМС, то для оценки максимальной ожидаемой средней прибыли из текущей минимальной выгоды поставщика еще следует вычесть стоимость разработки ТИМС (см. формулу (17), рис. 11):

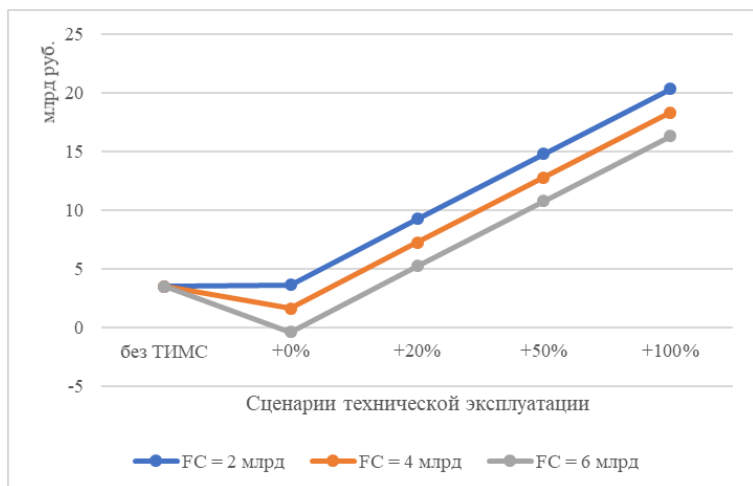


Рис. 11. Изменение максимальной прибыли поставщика с учётом стоимости разработки и внедрения ТИМС (контракт на 20 лет)

График изменения возможной прибыли поставщика свидетельствует о том, что разработка и внедрение технологий для сценария +0% невыгодна, так как не даёт положительного эко-

номического эффекта, однако для остальных сценариев может давать кратный выигрыш в прибыли поставщика.

С учетом различных значений FC диапазон взаимовыгодных цен несколько меняет свой вид: на рис. 12 приведен пример для $FC = 6$ млрд руб. в соответствии с формулами (20) и (21):

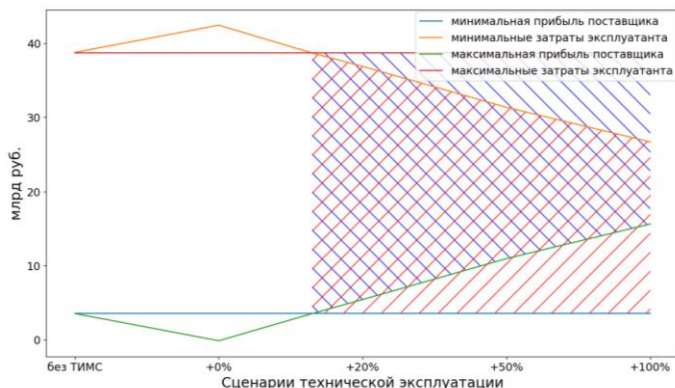


Рис. 12. Диапазоны изменения прибыли завода и затрат авиакомпаний (контракт на 20 лет)

Таким образом, показана возможность «ценового» урегулирования интересов организаций, лежащего в основе первого из рассматриваемых организационных механизмов. Для оценки эффекта объединения эксплуатантов в единый «пул» сравним значения минимально возможных ставок эксплуатации при сохранении исходной прибыли поставщика для изолированных регионов и для случая их совместного обслуживания поставщиком. Рассчитанные ставки приведены в таблице 6.

В результате расчётов получено, что объединение отдельных регионов в «пул» практически не даёт никакого выигрыша по ставке, если считать, что у каждого эксплуатанта одинаково изменилась межремонтная наработка. Однако на практике мы можем столкнуться с тем, что в силу различных условий эксплуатации у авиакомпаний будет происходить различное увеличение средней межремонтной наработки при внедрении ТИМС.

Таблица 6. Значения ставок эксплуатации для изолированных регионов и регионов, объединённых в единый «пул» (контракт на 20 лет)

Сценарий	«Пул» (3 региона вместе)	Изолированно регион 1	Изолированно регион 2	Изолированно регион 3
Без ТИМС	49 594	49 587	49 587	49 607
+0%	46 485	46 442	46 442	46 549
+20%	39 502	39 500	39 500	39 537
+50%	32 510	32 520	32 520	32 548
+100%	26 571	26 560	26 560	26 598

Пусть один из регионов эксплуатирует авиапарк в неблагоприятных условиях (регион 2), а у остальных произойдет увеличение межремонтной наработки +20%, +50% или +100% (см. таблицу 7). Примем $FC = 2$ млрд руб. Рассмотрим сценарии смешанного изменения межремонтной наработки в соответствии со следующей таблицей:

Таблица 7. Сценарии изменения межремонтной наработки при внедрении ТИМС

Сценарии:	Сц. 1	Сц. 2	Сц. 3
регион 1, 11 ВС	+20%	+50%	+100%
регион 2, 11 ВС	+0%	+0%	+0%
регион 3, 24 ВС	+20%	+50%	+100%

Сравним значения ставок эксплуатации при объединении в единый «пул» эксплуатантов с различной средней межремонтной наработкой (см. рис. 13).

Поскольку регион 2 эксплуатировался в неблагоприятных условиях, единая ставка для всего «пула» эксплуатантов оказывается ниже исходной ставки изолированного региона 2, таким образом, такой авиакомпании выгодно вступление в общий «пул». Что касается остальных эксплуатантов, для которых происходит существенное увеличение межремонтной наработки, для них единая ставка в «пуле» оказывается либо выше исходной (на 3.5% – Сц.1), либо чуть ниже исходной (–1% для Сц.2

и –3,5% Сц.3). Таким образом, авиакомпании, эксплуатирующие ВС в благоприятных условиях, не испытывают существенных выгод от вступления в общий «пул» с другими авиакомпаниями при заключении контракта на долгосрочный период.

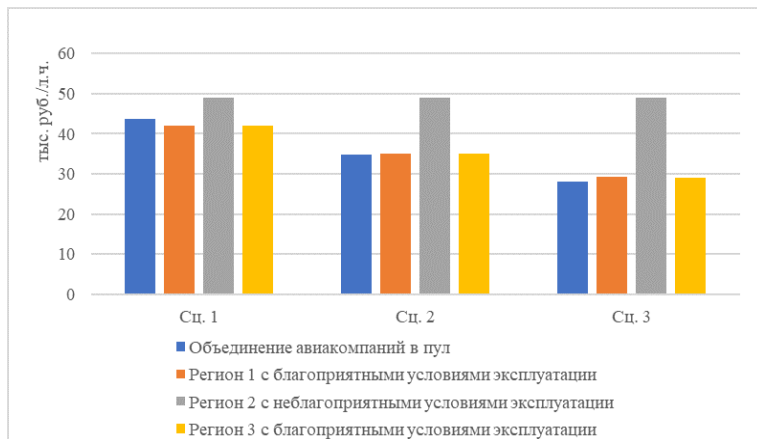


Рис. 13. Ставка эксплуатации (контракт на 20 лет)

4.2. МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭКСПЛУАТАЦИИ АВИАПАРКА НА СРЕДНЕСРОЧНОМ ПЕРИОДЕ

При рассмотрении среднесрочного периода считалось, что все формы ТОиР вследствие внедрения ТИМС производятся по фактическому состоянию. Рассмотрим вариант заключения договора между эксплуатантом и поставщиком на среднесрочный период ($T = 5$ лет). Покажем, что в таких условиях будет эффективен второй из рассматриваемых организационных механизмов внедрения ТИМС, а именно, заключение контракта о продаже лётного часа.

В отличие от долгосрочного периода (где выполнение тяжелых форм ТОиР оставалось привязано к единым межремонтным наработкам) на среднесрочном периоде коэффициент вариации величины затрат на ТОиР достигал 15%. Такое существенное отличие затрат на ТОиР от реализации к реализации обусловлено существенным отличием числа тяжелых форм ТОиР, выполненных за время среднесрочного контракта. В силу зна-

чительности разброса величины затрат на ТОиР тяжелых форм, её нельзя считать с помощью амортизации, как это было на долгосрочном периоде, следует вычислять фактические затраты на все формы ТОиР. В данной ситуации поставщик заинтересован в заключении с авиакомпаниями контракта типа РВН.

Определим размер страховой премии (брутто-премии, в дальнейшем обозначается БП). Страховая премия складывается из нетто-премии (в дальнейшем обозначается НП, представляет собой страховые резервы) и нагрузки (в дальнейшем обозначается Н, включает в себя расходы на ведение дела и премию для страховой компании):

$$(22) \text{ БП} = \text{НП} + \text{Н} = \text{НП} + \text{НП} \cdot f.$$

Пусть нагрузка вычисляется как доля от нетто-премии (в нашем случае в расчёты заложено $f = 0,1$). В свою очередь, нетто-премия складывается из рисковой премии (равной математическому ожиданию убытка вследствие наступления страхового случая) и рисковой надбавки (премия за риск):

$$(23) \text{ НП} = P_{\text{Пр}} + P_{\text{Надб}}.$$

Для оценки рисковой надбавки используем параметр 3σ , покрывающий основную долю риска наступления страхового случая (σ – среднеквадратическое отклонение фактических затрат на ТОиР от ожидаемых за период действия контракта) [16]. Таким образом:

$$(24) \text{ БП} = \text{НП} + \text{Н} = (P_{\text{Пр}} + P_{\text{Надб}})(1 + f).$$

Тогда суммарные затраты поставщика составляют

$$(25) \text{ COST}'_{\text{РВН}} = (C'_{\text{Л}} + C'_{\text{Т}} + FC + 3\sigma)(1 + f).$$

В таком случае минимальные затраты эксплуатанта при сохранении прежнего уровня прибыли поставщика составят

$$(26) \text{ EXP}'_{\text{РВН}} = \text{COST}'_{\text{РВН}} + R_{\text{ПОСТ}}.$$

Для определения ставки эксплуатации необходимо отнести суммарные затраты эксплуатанта к суммарному налёту:

$$(27) C_{\text{expРВН}} = \left(\frac{\text{EXP}'_{\text{РВН}}}{\eta} \right),$$

$$(28) C_{\text{exp}_{\text{РВН}}} = \left(\frac{(C'_\text{Л} + C'_\text{Т} + FC + 3\sigma)(1 + f) + R_{\text{ПОСТ}}}{\eta} \right).$$

Производителю выгоднее обслуживать как можно больше авиакомпаний, так как за счет эффекта масштаба риски снизятся и распределение вероятностей отказов будет более равномерным.

В соответствии формулой (28) ставка эксплуатации будет варьироваться в зависимости от величины FC от 40 до 120 тыс. руб. (см. рис. 14):

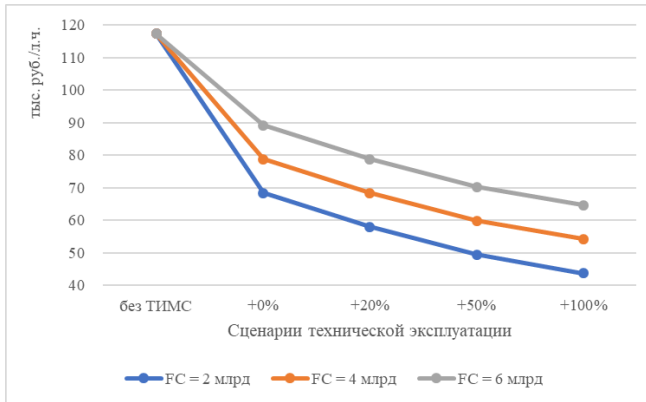


Рис. 14. Изменение ставки эксплуатации при внедрении ТИМС на примере региона 1 (контракт на 5 лет)

На рис. 15 представлено сравнение ставок эксплуатации для среднесрочного контракта с учетом рисковой надбавки (3σ) и без нее. При внедрении ТИМС рисковая надбавка составляет от 19% до 26% величины ставки эксплуатации.

Произведем сравнение полученных ставок эксплуатации для нескольких регионов для смешанного случая увеличения наработки (или его отсутствия) при внедрении ТИМС (см. таблицу 7). Полученные ставки приведены на рис. 16.

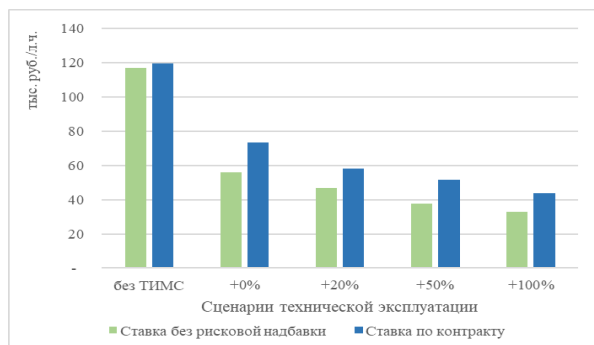


Рис. 15. Влияние рискованной надбавки на величину ставки эксплуатации, $FC = 0$ млрд руб.

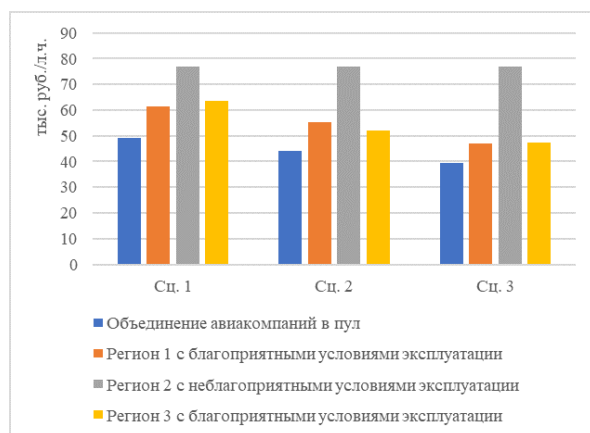


Рис. 16. Сравнение величины ставки эксплуатации при объединении различных авиакомпаний в «пул» ($FC = 2$ млрд руб.)

Распределение ставок при различных сценариях свидетельствует о том, что даже для авиакомпаний, эксплуатирующих ВС в благоприятных условиях (большое увеличение межремонтной наработки при внедрении ТИМС), выгодно объединение в «пул» и обслуживание по единой ставке при среднесрочном контракте (5 лет).

Получены аналогичные распределения для случаев $FC = 4$ млрд руб. (см. рис. 17) и $FC = 6$ млрд руб. (см. рис. 18).

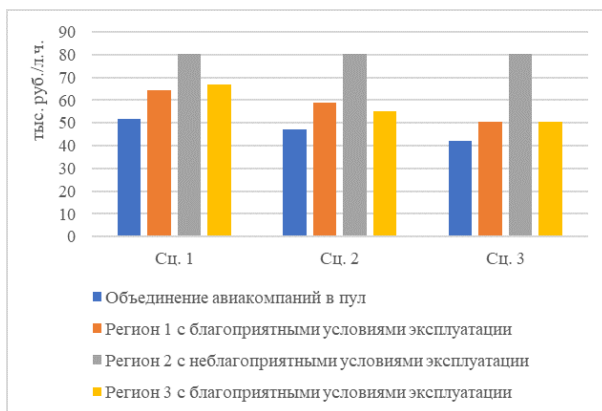


Рис. 17. Сравнение величины ставки эксплуатации при объединении различных авиакомпаний в «пул» ($FC = 4$ млрд руб.)

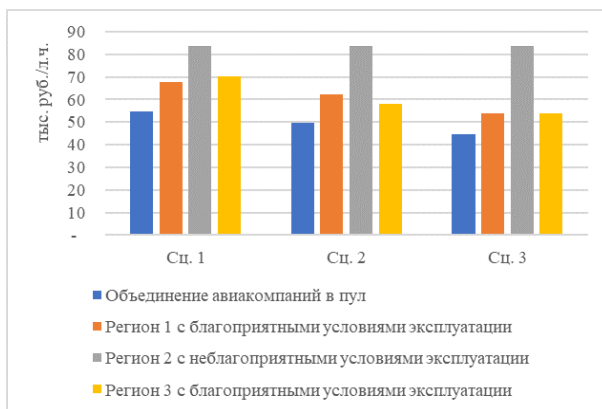


Рис. 18. Сравнение величины ставки эксплуатации при объединении различных авиакомпаний в «пул» ($FC = 6$ млрд руб.)

Если сравнить единые ставки для «пула», полученные в случае долгосрочного и среднесрочного контрактов (см. таблицу 8), то можно увидеть, что на среднесрочном периоде став-

ки выше, что в первую очередь обусловлено наличием надбавки за риск:

Таблица 8. Ставки эксплуатации при различных периодах T

	Сц.1	Сц.2	Сц.3
Контракт на 20 лет	43 608	34 797	28 185
Контракт на 5 лет	52 523	44 044	36 068

5. Заключение

На примере имитационного моделирования эксплуатации парка ВС показана эффективность рассматриваемых организационных механизмов внедрения ТИМС. Показано, что применение ТИМС позволяет эксплуатанту реже производить работы по ТОиР по сравнению с установленными Программой ТО наработками и, как следствие, уменьшить число требуемых запасных ВС для поддержания необходимого уровня готовности авиапарка. Благодаря этому удастся снизить издержки эксплуатанта на ТОиР, а также лизинговые затраты. При увеличении межремонтной наработки на 100% возможно максимальное снижение затрат на ТОиР и лизинг на 56% и 45% соответственно.

При расчете ожидаемых затрат на ТОиР при долгосрочном контракте необходимо производить амортизацию тяжелых форм ТОиР в течение срока эксплуатации. Определены диапазоны взаимовыгодных цен, при которых после введения ТИМС не убывает прибыль поставщика и не возрастают затраты эксплуатанта. Рассмотрены условия, при которых разработка и внедрение ТИМС не были бы экономически выгодны сторонам (лишь при отсутствии увеличения межремонтной наработки).

При долгосрочном контракте (20 лет) объединение различных эксплуатантов в «пул» позволяет предложить всем эксплуатантам единую ставку эксплуатации на уровне ставки для регионов с благоприятными условиями эксплуатации или немного ниже.

При среднесрочном контракте (5 лет) переход на фиксированную ставку оплаты ТОиР за лётный час может способствовать снижению рисков эксплуатантов и поставщика. При объединении в «пул» авиакомпаний, эксплуатирующих авиапарк как в благоприятных, так и в неблагоприятных условиях, формируется единая ставка эксплуатации ниже, чем таковая для изолированных регионов.

Литература

1. ДАЛЕЦКИЙ С.В, ДЕРКАЧ О.Я., ПЕТРОВ А.Н. *Эффективность технической эксплуатации самолетов гражданской авиации*. – М.: Воздушный транспорт, 2002.
2. КАСАТКИН А.А. *Методы моделирования и оптимизации уровня автономности технического обслуживания и ремонта парка авиационной техники гражданского назначения* // Управление большими системами. – 2023. – Вып. 104. – С. 5–35
3. КИРПИЧЕВ И.Г., КУЛЕШОВ А.А., ШАПКИН В.С. *Основы стратегии формирования конкурентных преимуществ российской авиационной техники на современном этапе* – М: Воздушный транспорт, 2007. – 334 с.
4. КЛОЧКОВ В.В. *Оптимизация экономических условий договора о техническом обслуживании и ремонте авиадвигателей* // Авиакосмическая техника и технология. – 2004. – №1. – С. 64–70.
5. КУЛЕШОВ А.А., ФИЛИМОНОВ А.В., ШАПКИН В.С. *Вопросы использования данных мониторинга технического состояния авиационного двигателя в системе управления безопасностью полетов разработчика* // ТВФ. – 2023. – №1. – С. 36–41.
6. ПИСАРЕНКО В.Н. *Техническое обслуживание воздушных судов как система поддержания летной годности гражданской авиационной техники*. – Самара: Изд-во СамНЦ РАН, 2017 – 170 с.

7. РИХТЕР К., ВАЛЬТЕР Й. (ред) *Интеграция поставщиков и глобализация решений в гражданском авиастроении. Сборник статей.* – СПб.: Питер, 2021 – 352 с.
8. САРКИСЯН С.А., СТАРИК Д.Э. *Экономика авиационной промышленности* – М.: Высшая школа, 1985 – 320 с.
9. СЕРЬЁЗНОВ А.Н., КУЗНЕЦОВ А.Б., ЛУКЬЯНОВ А.В. и др. *Применение оптоволоконных технологий при создании встроенных систем самодиагностики авиационных конструкций* // Научный вестник НГТУ. – 2016. – Т. 64, №3. – С. 95–105.
10. ТЮРИН Ю.А. *Некоторые вопросы состояния эксплуатации и разработки авиадвигателей в России* // Авиатранспортное обозрение. – 1999. – №9. – С. 50–58.
11. ЧЕТЫРКИН Е.М. *Финансовая математика* – М.: Дело, 2002 – 400с.
12. AZEVEDO D., CARDOSO A., RIBEIRO B. *Estimation of health indicators using advanced analytics for prediction of aircraft systems remaining useful lifetime* // PHM Society European Conference. – 2020. – Vol. 5, No. 1. – P. 10.
13. FIGUEIREDO-PINTO D.G., ABRAHÃO F., FAN I.S. *An Operational Availability Optimization Model Based on the Integration of Predictive and Scheduled Maintenance* // Proc. of the 6th European Conf. of the Prognostics and Health Management Society, 2021.
14. KHORASANI K, KORDESTANI M. *An Overview of the State-of-the-Art in Aircraft Prognostic and Health Management Strategies* // IEEE Trans. on Instrumentation and Measurement, 2023.
15. LEAO B.P., FITZGIBBON K.T., PUTTINI L.C. et al. *Cost-benefit analysis methodology for PHM applied to legacy commercial aircraft* // IEEE Aerospace Conference, 2008. – P. 1–13.
16. LEITE J.D. *Engine Contract Comparisons* // Engine Yearbook. – 2003. – P. 26–31.
17. MEISSNER R., MEYER H., WICKE K. *Concept and economic evaluation of prescriptive maintenance strategies for an automated condition monitoring system* // Int. Journal of Prognostics and Health Management. – 2021. – Vol. 12(3).

18. MOGHADDASS R., ZUO M. J. *An integrated framework for online diagnostic and prognostic health monitoring using a multistate deterioration process* // Reliability Engineering & System Safety. – 2014. – Vol. 124. – P. 92–104.
19. RAHN A. *Developing prescriptive maintenance strategies in the aviation industry based on a discrete-event simulation framework for post-prognostics decision making* // Reliability Engineering & System Safety. – 2021.
20. SCHILLING T., GOLLNICK V. *System Analysis of Prognostics and Health Management Systems for Future Transport Aircraft* // 28th Congress of the Int. Council of the Aeronautical Sciences, 23–28 September 2012, Brisbane, Australia.
21. TSEREMOGLOU I., SANTOS B.F. *Condition-based maintenance scheduling of an aircraft fleet under partial observability: A deep reinforcement learning approach* // Reliability Engineering & System Safety, 2024. – Vol. 241. – P. 109582.
22. VERHAGEN W.J.C., SANTOS B.F., FREEMAN F. et al. *Condition-Based Maintenance in Aviation: Challenges and Opportunities* // Aerospace. – 2023. – Vol. 10. – P. 762.
23. WILLIS C. *Engine Leasing and Maintenance* // Engine Yearbook. – 2003.

MATHEMATICAL MODELS OF ORGANIZATIONAL MECHANISMS FOR IMPLEMENTING TECHNOLOGIES FOR INDIVIDUAL MONITORING OF THE CONDITION OF AVIATION EQUIPMENT PRODUCTS

Andrey Kasatkin, National Research Center «Zhukovsky Institute», Zhukovsky (kasatkinaa@nrczh.ru).

Valeria Rakhmanina, National Research Center «Zhukovsky Institute», Zhukovsky (rakhmaninave@nrczh.ru).

Abstract: The paper considers the coordination of economic interests of the participants in the maintenance and repair of aircraft and their systems, when changing the approach to their technical operation, due to the application of technologies for individual monitoring of the condition of aircraft objects. The introduction of such technologies is expected to increase the durability of aircraft products and extend their actual lifetime. From the economic point of view, this may cause a decrease in the profit of developers and manufacturers of aircraft products, as well as organiza-

tions engaged in their maintenance and repair. The paper considers the economic mechanisms of implementation of these technologies, allowing to ensure their attractiveness both for the above organizations and for the operators. Thus, mutually beneficial price ranges for modified products are determined, and a method of their realization together with maintenance and repair works in the format of selling aircraft operation at a fixed rate per flight hour is proposed. Simulation modeling of scheduled flights in several regions together with aircraft maintenance and repair is carried out. A comparison of the costs of flight fulfillment at different effects from the introduction of such technologies in ensuring the quality-of-service provision has been made. The paper shows that when several operators are combined into a pool in order to determine a single sales rate for all operators, it is possible to offer a single sales rate lower than when operators are serviced separately.

Keywords: individual monitoring of condition, coordination of economic interests, uniform sales rate.

УДК 051.7 + 629.7

ББК 39.585

*Статья представлена к публикации
членом редакционной коллегии В.В. Ключковым.*

*Поступила в редакцию 10.06.2024.
Опубликована 31.07.2025.*