

УДК 623.74

БОРТОВЫЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ ТАКТИЧЕСКОГО УРОВНЯ НА ФАЗАХ ПОСАДКИ ВОЗДУШНОГО СУДНА

© 2025 г. С. Ю. Коконцева^а, *, Б. Е. Федун^а, **, Н. Д. Юневич^а, ***

^аФАУ “ГосНИИАС”, Москва, Россия

*e-mail: kokonceva@gosniias.ru

**e-mail: boris_fed@gosniias.ru

***e-mail: yunev@gosniias.ru

Поступила в редакцию 30.12.2023 г.

После доработки 19.07.2024 г.

Принята к публикации 13.01.2025 г.

Статья посвящена проблематике интеллектуальной поддержки экипажа воздушного судна в ситуации, когда в процессе выполнения экипажем полетного задания возникает коллизия “Выполняемый этап полетного задания — Непосредственная угроза его выполнению”. Бортовые интеллектуальные системы тактического уровня обеспечивают экипажу интеллектуальную поддержку в этой ситуации. Они выделяют среди наблюдаемых потенциальных угроз непосредственную (фиксируют коллизию), рекомендуют экипажу способ противодействия этой угрозе (решают задачу оперативного целеполагания, возникающую у экипажа при появлении коллизии), предлагают экипажу детализацию этого способа. Представлена одна из таких систем, реализованная в форме бортовой оперативно советующей экспертной системы завершающих фаз посадки воздушного судна. Ее демонстрационный образец, адаптированный к бортовой информационной среде воздушного судна МС-21, успешно прошел исследовательские испытания с профессиональным летчиком на стенде полунатурного моделирования “Комплекс бортового оборудования самолета МС-21” в ФАУ “ГосНИИАС”.

Ключевые слова: этап полета, фаза этапа полета, полетное задание, внешняя угроза, целеполагание, интеллектуальная система, база знаний, демонстрационный образец

DOI: 10.31857/S0002338825010105 EDN: AHVJXV

TACTICAL-LEVEL ON-BOARD INTELLIGENT SYSTEMS DURING THE PHASES OF AIRCRAFT LANDING

S. Yu. Kokontseva^а, *, B. E. Fedunov^а, **, N. D. Yunevich^а, ***

^аFAA GosNIIAS, Moscow.

*e-mail: kokonceva@gosniias.ru

**e-mail: boris_fed@gosniias.ru

***e-mail: yunev@gosniias.ru

The article is devoted to the problems of intellectual support for the aircraft crew in a situation when, in the process of performing a flight task by the crew, a conflict arises “The stage of the flight task being performed is an immediate threat to its fulfillment”. Onboard intelligent tactical-level systems provide the crew with intelligent support in this situation. They identify an immediate threat among the observed potential threats (fix a collision), recommend to the crew a way to counter this threat (solve the task of operational goal setting that occurs to the crew when a collision occurs), recommend to the crew the details of this method.

One of these systems is presented, implemented in the form of an on-board operationally advising expert system for the final phases of aircraft landing BOSES-P.

Its demonstration sample, adapted to the on-board information environment of the MS-21 aircraft, successfully passed research tests with a professional pilot at the MS-21 semi-natural modeling stand at the GosNIIAS FAA.

Keywords: flight stage, phase of flight stage, flight mission, external threat, goal setting, intelligent system, knowledge base, demonstration sample

Введение. Перед вылетом воздушного судна (ВС) экипаж получает полетное задание (ПЗ), содержащее цель вылета и детализированный по этапам полета способ достижения этой цели. Каждому этапу приписывается цель этого этапа, согласованная с целью вылета, и способ достижения цели этого этапа.

При появлении в процессе полета коллизии “Выполняемый этап полета — Непосредственная угроза выполнению ПЗ” экипаж должен [1]:

- а) обнаружить эту непосредственную угрозу среди наблюдаемых потенциальных угроз;
- б) определить способ противодействия этой угрозе;
- в) детализировать этот способ до уровня, позволяющего его реализовать бортовыми исполнительными системами самолета.

Интеллектуальную поддержку в решении этих так называемых тактических задач экипажу оказывают бортовые интеллектуальные системы тактического уровня (БИС-ТУ) [2]. При выполнении полетного задания экипажу обеспечиваются:

а) осмотрительность путем предъявления на информационно управляющем поле (ИУП) кабины обнаруженных потенциальных угроз ПЗ. В настоящее время это делают штатные бортовые алгоритмы, реализованные в бортовых цифровых вычислительных машинах (БЦВМ-алгоритмы);

б) ситуационная осведомленность путем предъявления на ИУП кабины возникшей коллизии “Выполняемый этап полета — Непосредственная угроза выполнению ПЗ” с информацией о “точке невозврата” возникшей непосредственной угрозы. Ситуационную осведомленность экипажу обеспечивают интеллектуальные информационные системы “Ситуационная осведомленность экипажа” (ИИС СОЭ), входящие в БИС-ТУ;

в) ситуационная уверенность за счет своевременной рекомендации:
— эффективного способа противодействия возникшей угрозе, вырабатываемого входящими в БИС-ТУ бортовыми оперативно советующими экспертными системами “Оперативное целеполагание” (БОСЭС-целеполагание);

поэтапной детализации рекомендованного способа, вырабатываемого бортовыми оперативно советующими экспертными системами этапов полета (БОСЭС-этапа полета), также входящими в БИС-ТУ.

Остановимся на одной особенности взаимодействия БИС-ТУ с экипажем. Если ИИС СОЭ предъявляет экипажу только информацию о возникших коллизиях, то другие БИС-ТУ, реализованные в форме БОСЭС, уже рекомендуют экипажу сами решения оперативно возникших тактических задач.

Как правило, в базах знаний БИС-ТУ для решения возникающих задач используются следующие методы решения: по прецеденту [3], оперативного многокритериального выбора альтернативы [4], оптимизационные [2]. В двух последних методах применяются математические модели деятелей предметной области (интеллектуальные агенты [5]), достаточно подробно описывающие их функции, и математические модели взаимодействия этих деятелей [5]. Ясность описания предметной области в базе знаний БИС-ТУ позволяет убедительно представлять ее пользователю и адресно редактировать базу знаний в процессе эксплуатации БИС-ТУ [6].

База знаний каждой БИС-ТУ разрабатывается поэтапно. На каждом этапе создается очередная версия базы знаний. Версия базы знаний БИС-ТУ, в которую включены все типы процедур, содержащихся в завершающей версии базы знаний, называется демонстрационной версией. Именно она вместе с результатами ее исследовательских испытаний на стенде полнатурного моделирования предъявляется Заказчику для подтверждения возможности сделать окончательную версию базы знаний этой БИС-ТУ.

Следует заметить, что в настоящее время созданные и разрабатываемые БИС-ТУ ориентированы на работу в условиях полностью работоспособного борта ВС и его экипажа. Однако именно в условиях частичной потери работоспособности борта и/или экипажа (иначе “отказные ситуации” или внутрибортовые непосредственные угрозы) интеллектуальная поддержка экипажа при решении возникших при этом тактических задач крайне необходима. Приступая к разработке БИС-ТУ, способных эффективно работать в “отказных ситуациях”, инженерам будет полезно использовать [6–9].

Представляемая ниже БОСЭС завершающих фаз полета ВС “Посадка” БОСЭС-П является примером первой БИС-ТУ, демонстрационный образец которой БОСЭС-П (02.2) прошел на стенде полунатурного моделирования реальную проверку его функционирования при исследовательских испытаниях с профессиональным летчиком.

1. БОСЭС-П завершающих фаз посадки ВС. Интеллектуальная поддержка экипажа ВС на завершающих фазах посадки реализована в форме БОСЭС-П. Она предъявляет экипажу конструктивные рекомендации по способу противодействия возникшим внешним угрозам: 1) попутный ветер, 2) слабое торможение, 3) боковой ветер, 4) “козление”, которые часто возникают на завершающих фазах этапа полета “Посадка”: № 1 “Снижение по глиссаде”, № 2 “Выравнивание”, № 3 “Пробег по взлетно- посадочной полосе (ВПП) аэродрома с торможением”, № 4 “Пробег по ВПП с разгоном”, № 5 “Взлет”.

База знаний БОСЭС-П ориентирована на работу в штатной бортовой информационной среде ВС с использованием оперативной информации: 1) о состоянии выбранной для посадки ВПП (оперативно сообщенный диспетчером коэффициент сцепления шасси ВС с поверхностью ВПП), 2) о направлении и силе ветра, 3) количественной информации об ошибках выдерживания летчиком глиссады.

Наиболее близкими аналогами к БОСЭС-П являются системы, защищенные патентами [10–12], и системы, представленные в публикациях [13–15]. К недостаткам этих аналогов можно отнести то, что ни один из них не охватывает фазу посадки “Пробег по ВПП”, на которой при посадке с попутным/боковым ветром и слабым торможением экипажу приходится постоянно оценивать достаточность оставшегося участка ВПП для достижения скорости схода ВС с ВПП и для возможности реализовать решение “Прекратить торможение. Взлетать”. В последнем случае после отрыва ВС от ВПП экипаж должен выбрать одно из возможных решений – “Второй круг” или “Запасной аэродром”, и интеллектуальная поддержка в этом ему будет весьма полезна.

Представим блоки базы знаний БОСЭС-П [16, 17].

Блок “Диспетчер базы знаний БОСЭС-П” определяет моменты включения и выключения БОСЭС-П, моменты принятия летчиком решения о переходе с текущей фазы посадки на выбранную им другую.

Блок “Координация ВС относительно входного створа ВПП” работает с момента включения БОСЭС-П и до момента схода ВС с ВПП или до момента ухода ВС с курса ВПП, наступающего после взлета с прерванного пробега.

В блоке с момента прохода ВС входного створа ВПП определяется длина использованного ВС отрезка ВПП $L_{\text{исп}}(t)$ по формуле:

$$L_{\text{исп}}(t) = \int_{t_{\text{сход1}}}^t V_x(\tau) d\tau - \Delta L_0,$$

где

$$\Delta L_0 = \frac{H(t_{\text{сход1}})}{\text{tg}\theta}.$$

Здесь $t_{\text{сход1}}$ – момент схода ВС (сход1) с глиссады (момент включения БОСЭС-П), $H(t_{\text{сход1}})$ – высота точки глиссады, над/под которой находилось ВС в момент $t_{\text{сход1}}$, $V_x(t)$ – проекция текущей скорости ВС на ось ВПП, θ – угол наклона глиссады к оси ВПП. На ИУП кабины летчику подается величина $L_{\text{исп}}(t)$ с того момента, когда она становится неотрицательной.

1.1. Блоки базы знаний БОСЭС-П фазы посадки № 1 “Снижение по глиссаде”. Возникающая на фазе посадки № 1 тактическая задача оперативного целеполагания решается по прецеденту [3]. База знаний этой фазы посадки включает в себя:

- базу процедурных матриц знаний по каждой ожидаемой на этой фазе посадки внешней угрозе из числа названных выше угроз и возможных их сочетаний;

- блок активизации одной из этих процедурных матриц знаний, относящейся к реально возникшей угрозе;

- блок оцифровки ситуационного вектора SV активизированной процедурной матрицы знаний в соответствии с наблюдаемой внешней обстановкой на этой фазе посадки;

– блок “Определения способа противодействия возникшей угрозе по процедурам оцифрованной активизированной процедурной матрице знаний”.

Примечание 1. Приведенное в блоке фазы посадки № 1 и блоке фазы посадки № 2 (см. ниже) описание метода решения задачи по прецеденту подробно представлено ниже для фазы посадки № 5, где этот метод тоже применяется.

1.2. Блоки базы знаний БОСЭС-П фазы посадки № 2 “Выравнивание”. Возникающая на фазе посадки № 2 тактическая задача решается по прецеденту [3]. База знаний этой фазы посадки включает в себя:

– базу процедурных матриц знаний по каждой ожидаемой на этой фазе посадки внешней угрозе из числа названных выше угроз и возможных их сочетаний;

– блок активизации одной из этих процедурных матриц знаний, относящейся к реально возникшей угрозе;

– блок оцифровки ситуационного вектора SV активизированной процедурной матрицы знаний в соответствии с наблюдаемой внешней обстановкой на этой фазе посадки;

– блок определения способа противодействия возникшей угрозе по процедурам оцифрованной активизированной процедурной матрице знаний.

1.3. Блоки базы знаний БОСЭС-П фазы посадки № 3 “Пробег по ВПП с торможением”. База знаний этой фазы посадки включает в себя следующие блоки:

Блок 1.3.1. Определение на фазе посадки № 3 момента наступления величины установившегося ускорения торможения. “Скользящим интервалом” находится момент выхода измеряемой скорости $V_x(t)$ пробега ВС на “линейный участок”. По нему задается установившееся ускорение торможения на пробеге $a_v^*(t)$ (“полка” ускорения торможения), которое после выхода на “полку” передается в блок 1.3.2.

Блок 1.3.2. Расчет величины отрезка ВПП, необходимого ВС для достижения скорости схода с ВПП и передача его (для повышения ситуационной осведомленности экипажа на фазе посадки № 3) на ИУП кабины и в блок 1.3.4, описанный ниже. Прогнозная текущая длина $L(t, V_{сход2})$ отрезка ВПП, необходимая для достижения на пробеге (с текущего момента пробега t) скорости схода $V_{сход2}$ с ВПП, равна:

$$L(t, V_{сход2}) = \int_t^{t_{сход2}} (V_x(\tau) + a_v^*(\tau)) d\tau,$$

где

$$t_{сход2} = \frac{V_x(t) - V_{сход2}}{a_v^*(t)}.$$

Замечание 1. Использование в вычислении прогнозируемой потребной длины отрезка ВПП $L(t, V_x(t), V_{сход2})$ текущей оценки $a_v^*(t)$ горизонтального ускорения, поступающей из блока 1.3.1, позволяет учитывать возможное фактическое изменение этой величины в ходе движения ВС по ВПП.

Текущий прогноз полной величины отрезка ВПП, который будет пройден ВС к моменту достижения им в конце пробега скорости схода $V_{сход2}$ с ВПП, равен сумме длины отрезка ВПП, уже использованного к текущему моменту $L_{исп}(t)$, и длины прогнозного отрезка:

$$L_{сход}(t, V_{сход2}) = L_{исп}(t) + L(t, V_x(t), V_{сход2}).$$

Текущая оценка $\Delta L_{сход}(t, V_{сход2})$ запаса ВПП после успешного завершения пробега (достижения ВС скорости $V_{сход2}$) равна:

$$\Delta L_{сход}(t, V_{сход2}) = L_{ВПП} - L_{сход}(t, V_{сход2}),$$

где здесь и далее нижний индекс в $L_{ВПП}$ – это сокращение названия “взлетно-посадочная полоса”.

Текущие значения $L_{сход}(t, V_{сход2})$ и $\Delta L_{сход}(t, V_{сход2})$ передаются на ИУП и в блок 1.3.4, который приведен ниже.

Блок 1.3.3. Определение на фазе посадки № 3 текущего отрезка ВПП, необходимого для достижения ВС скорости отрыва от ВПП в предположении, что экипаж в этот момент примет решение “Прекратить торможение. Взлетать”. Длина этого участка ВПП выражается функцией $L_{отр}(V_{отр}, V_{реш}, k_{сц})$, где $k_{сц}$ – коэффициент сцепления с ВПП, значение которого передается на борт ВС диспетчерской службой аэропорта, $V_{реш}$ – скорость, на которой экипаж примет решение, $V_{отр}$ – скорость отрыва ВС от ВПП. Получение $L_{отр}(V_{отр}, V_{реш}, k_{сц})$ по экспериментальным данным описано ниже.

Замечание 2. Для каждого аэродрома величина $k_{сц}$ обычно периодически определяется аэродромными службами и передается на борт самолета, готовящегося к посадке на этот аэродром.

Текущий прогноз полной величины отрезка ВПП, который будет использован ВС в момент достижения им скорости отрыва, равен сумме длины отрезка ВПП, уже пройденного к текущему моменту $L_{исп}(t)$, и длины прогнозного отрезка $L_{отр}(V_{отр}, V_{реш}, k_{сц})$. Величина невостребованного участка ВПП на момент времени, когда ВС достигнет скорости отрыва от ВПП, равна $\Delta L_{отр}(t, V_{отр}) = L_{ВПП} - (L_{исп}(t) + L_{отр}(V_{отр}, V_{реш}, k_{сц}))$. Она передается в блок 1.3.4 (см. ниже).

Разработка математических зависимостей для определения $L_{отр}(V_{отр}, V_{реш}, k_{сц})$ выполнена на основе экспериментальной информации следующим образом. На стенде отработки комплекса бортового оборудования (КБО) самолета МС-21 была проведена серия экспериментов по выполнению посадок МС-21. Эксперименты выполнялись при посадочном весе ВС $G_{псд} = 69\ 100$ кг, заданных значениях скоростей отрыва ВС от ВПП $V_{отр}$, различных значениях коэффициента сцепления с ВПП $k_{сц}$ и скоростях пробега $V_{реш}$, на которых летчик принимал решение “Прекратить торможение. Взлетать”.

Для каждого значения $k_{сц}$ полученная в эксперименте зависимость $L_{отр}(V_{реш}, k_{сц})$ аппроксимировалась формулой:

$$L_{отр}(V_{реш}, k_{сц}) = b_1(k_{сц})V_{реш}^3 + b_2(k_{сц})V_{реш}^2 + b_3(k_{сц})V_{реш} + b_4(k_{сц}). \quad (1.1)$$

Это позволило получить значения коэффициентов $b_i(k_{сц})$, $i = 1-4$, для ряда фиксированных значений $k_{сц}$. Затем эти значения были аппроксимированы полиномами второго порядка:

$$b_i(k_{сц}) = c_{i1}k_{сц}^2 + c_{i2}k_{сц} + c_{i3}, \quad i = 1-4. \quad (1.2)$$

Таким образом, в блоке 1.3.3 по формуле (1.2) для произвольных значений $k_{сц}$ рассчитываются значения коэффициентов выражения (1.1), по которым в свою очередь вычисляется значение $L_{отр}(V_{реш}, k_{сц})$.

Блок 1.3.4. Рекомендация экипажу на фазе посадки № 3 способа противодействия возникшей внешней угрозе. Рекомендации вырабатываются непротиворечивым набором продукционных правил. Приведем некоторые из них:

– если величина $\Delta L_{сход}(t, V_{сход2})$ много больше нуля и величина $\Delta L_{отр}(t, V_{отр}) = L_{ВПП} - (L_{исп}(t) + L_{отр}(V_{отр}, V_{реш}, k_{сц}))$ больше нуля, то рекомендуется “Продолжить пробег по ВПП с торможением”;

– если $\Delta L_{сход}(t, V_{сход2})$ близка к нулю и $\Delta L_{сход}(t, V_{сход2}) = L_{ВПП} - (L_{исп}(t) + L_{отр}(V_{отр}, V_{реш}, k_{сц}))$ допустимо больше нуля, то предлагается “Прекратить торможение. Взлетать”.

Выработанная рекомендация передается на ИУП.

1.4. Блоки базы знаний БОСЭС-П (02.2) фазы посадки № 4 “Пробег по ВПП с разгоном”. База знаний этой фазы посадки включает в себя следующие блоки.

Блок 1.4.1. “Определение на фазе посадки № 4 момента наступления и величины установившегося ускорения разгона. В этом блоке “скользящим интервалом” по измеряемым скоростям разгона V_x определяется момент выхода измеряемой скорости разгона ВС на “линейный участок”. По нему формируется установившееся ускорение разгона на пробеге $a_v^*(t)$ (“полка” ускорения разгона).

Текущее ускорение разгона $a_v^*(t)$, фиксируемое после выхода на “полку”, передается в блок 1.4.2.

Блок 1.4.2. Расчет величины отрезка ВПП, необходимого ВС для достижения скорости отрыва ВС от ВПП. Прогнозная текущая длина $L(t, V_{\text{отр}})$ ВПП, необходимая для достижения ВС на пробеге с разгоном (с текущего момента пробега t) скорости отрыва $V_{\text{отр}}$ ВС от ВПП, равна:

$$L(t, V_{\text{отр}}) = \int_t^{t_{\text{отр}}} (V_x(t) + a_v^*(t)\tau) d\tau,$$

где

$$t_{\text{отр}} = \frac{V_{\text{отр}} - V_x(t)}{a_v^*(t)};$$

$L(t, V_{\text{отр}})$ передается на ИУП для повышения ситуационной осведомленности экипажа на фазе посадки № 4.

1.5. Блоки базы знаний БОСЭС-П фазы посадки № 5 “Взлет”. На фазе посадки № 5 после отрыва ВС от ВПП экипаж ВС решает задачу “Куда лететь?”. В базе знаний этой фазы посадки ответ находится по прецеденту. Для этого по материалам успешных посадок ВС в условиях, когда появлялись названные выше непосредственные угрозы (НУГ) “Попутный ветер”, “Слабое торможение”, “Боковой ветер”, “Козление”, были разработаны необходимые процедурные матрицы знания.

Для понимания дальнейшего ниже приведем необходимые сведения по методу решения задачи по прецеденту, взятые из [3, 18].

П р и м е ч а н и е 2. Прецедент – это апробированный на практике способ успешного решения задачи, которая аналогична возникшей задаче. Условия, в которых была решена аналогичная задача, описаны так называемым ситуационным вектором ($SV(\dots)$). Каждая координата $SV(\dots)$ представляется лингвистической переменной (ЛП). Термам каждой ЛП ставится во взаимно однозначное соответствие набор нечетких множеств (НМ). Каждое НМ представляется своим универсальным множеством (УМ) и определенной на УМ функцией принадлежности $\mu(\text{НМ})$. Функция принадлежности (ФП) для каждой точки УМ определяет степень ее принадлежности НМ. Значения степени принадлежности выбираются из отрезка $[0,1]$. Введенные НМ каждой ЛП определены на одном и том же УМ, которое относится только к этой ЛП. В процедурной матрице знаний выделены блоки прецедентов. Каждый блок приписывается своему прецеденту. Каждая строка блока – это условия, в которых успешно решалась по этому прецеденту аналогичная задача. В каждой строке блока процедурной матрицы знаний к стоящим в нем НМ применена операция нечеткого отношения, результат применения которой – НМ этой строки. НМ каждой строки блока определено на УМ, являющемся декартовым произведением УМ, на котором определены НМ, стоящих в этой строке. Заметим, что это УМ одинаково для всех блоков процедурной матрицы. Именно на нем определены строчные НМ, к которым применяется операция нечеткого объединения строчных множеств. Полученное при этом НМ блока промежуточной матрицы является также НМ прецедента, к которому относится этот блок процедурной матрицы знаний. При оперативном решении возникшей задачи условия, в которых ее приходится решать (координаты $SV(\dots)$), оцифровываются. Это выделяет в УМ, на котором определено НМ прецедента, соответствующую точку. Значение ФП НМ прецедента определяет его приоритет. Прецедент с наибольшим приоритетом успешно решает возникшую задачу.

П р и м е ч а н и е 3. Напомним [18], что нечеткое отношение НМ1, НМ2, НМ3, каждое из которых определено на своем 1УМ, 2УМ, 3УМ и имеет соответственно ФП $\mu(\text{НМ1})$, $\mu(\text{НМ2})$, $\mu(\text{НМ3})$, конструирует НМ нечеткого отношения НМ1, НМ2, НМ3 с ФП $\mu(\text{нечеткого отношения НМ1, НМ2, НМ3}) = \min(\mu(\text{НМ1}), \mu(\text{НМ2}), \mu(\text{НМ3}))$, определенную на УМ(нечеткое отношение НМ1, НМ2, НМ3), являющемся декартовым произведением 1УМ x 2УМ x 3УМ. Так строятся строчные НМ в Примечании 2. Заметим, что все строчные НМ определены на одном и том же УМ. Упомянутая в Примечании 2 операция объединения строчных НМ конструирует НМ блока процедурной матрицы знаний с ФП $\mu(\text{нечеткое объединение строчных НМ блока процедурной матрицы знаний}) = \max(\mu(\text{строчное НМ первой строки блока}), \mu(\text{строчное НМ второй строки блока}), \mu(\text{строчное НМ последней строки блока}))$.

База знаний фазы посадки № 5 содержит следующие блоки.

Таблица 1. Процедурная матрица знаний для сочетания НУГ “Попутный ветер” и “Слабое торможение”: процедуры матрицы. Через УМ (*) обозначено декартово произведение 1НМ x 2НМ x 3НМ

Процедурная матрица знаний НУГ “Попутный ветер” и “Слабое торможение”							
Номер блока матрицы	Номер строки блока	Ситуационный вектор $SV(X1, X2, X3)$			Операция нечеткого отношения по строкам. Результат: строчные НМ строк матрицы. УМ (*)	Операция нечеткого объединения строчных НМ в блоке. Результат: НМ блоков матрицы. НМ прецедентов. УМ (*)	Прецеденты
		X1 = ЛП “Попутный ветер” Терм 1.1 Терм 1.2 Терм 1.3 НМ:1.1 НМ:1.2 НМ:1.3 1УМ	X2 = ЛП “Ускорение торможения” Терм 2.1 Терм 2.2 Терм 2.3 НМ: 2.1 НМ:2.2 НМ:2.3 2УМ	X3 = ЛП “Время ожидания” Терм 3.1 Терм 3.2 Терм 3.3 НМ: 3.1 НМ: 3.2 НМ: 3.3 3УМ			
1	1.1	Терм 1.1 НМ:1.1	Терм 2.2 НМ:2.2	Терм 3.3 НМ:3.3	Строчное НМ строки 1.1	НМ блока 1	НМ прецедента “Второй круг”
	1.2	Терм 1.2 НМ:1.2	Терм 2.3 НМ:2.3	Терм 3.2 НМ:3.2	Строчное НМ строки 1.2		
2	2.1	Терм 1.3 НМ:1.3	Терм 2.1 НМ:2.1	Терм 3.1 НМ:3.1	Строчное НМ строки 2.1	НМ блока 2	НМ прецедента “Запасной аэродром”
	2.2	Терм 1.2 НМ:1.2	Терм 2.2 НМ:2.2	Терм 3.1 НМ:3.1	Строчное НМ строки 2.2		

Таблица 2. Взаимно однозначное соответствие термов ЛП и НМ в процедурной матрице знаний для сочетания НУГ “Попутный ветер” и “Слабое торможение”

Координаты ситуационного вектора $SV(X1, X2, X3)$ и соответствующие им НМ			
SV	X1 = ЛП “Попутный ветер”	X2 = ЛП “Ускорение торможения”	X3 = ЛП “Время ожидания”
Термы ЛП	Терм 1.1 “Слабый”. НМ:1.1, ФП: μ (НМ:1.1) на 1УМ	Терм 2.1 “Слабое”. НМ:2.1, ФП: μ (НМ:2.1) на 2УМ	Терм 3.1 “Малое”. НМ:3.1, ФП: μ (НМ:3.1) на 3УМ
	Терм 1.2 “Умеренный”, НМ:1.2, ФП: μ (НМ:1.2) на 1УМ	Терм 2.2 “Среднее”. НМ:2.2, ФП: μ (НМ:2.2) на 2УМ	Терм 3.2 “Среднее”. НМ:3.2, ФП: μ (3.2) на 3УМ
	Терм 1.3 “Сильный”. НМ: 1.3, ФП: μ (НМ:1.3) на 1УМ	Терм 2.3 “Нормальное”. НМ: 2.3, ФП: μ (НМ:2.3) на 2УМ	Терм 3.3 “Большое”. НМ:3.3, ФП: μ НМ:(3.3) на 3УМ
УМ	1УМ = [0.0, 15.0]	2УМ = [−0.1, −4.0]	3УМ = [5.0, 30.0]
Размерность точек УМ	м/с	м/с ²	мин

Блок 1.5.1. База процедурных матриц знаний. В нее включены процедурные матрицы знаний для каждой ожидаемой на фазе посадки № 5 внешней угрозы (из числа названных выше угроз) и возможных их сочетаний.

Блок 1.5.2. Активизация процедурной матрицы знаний из набора процедурных матриц знаний для фазы посадки № 5. Представим активизированную процедурную матрицу знаний, соответствующую сочетанию НУГ “Попутный ветер” и “Слабое торможение” (табл. 1). В процедурной матрице знаний два блока прецедентов: блок прецедента “Второй круг” и блок прецедента “Запасной аэродром”.

Ситуационный вектор процедурной матрицы знаний $SV(X1, X2, X3)$ имеет три координаты. Опишем их.

Таблица 3. Значения ФП $\mu(\text{НМ:1.1})$ на участках 1УМ

Участки 1УМ	1	2	3
Интервал участка на 1УМ	0.0–4.0	4.0–6.0	6.0–5.0
Значение $\mu(\text{НМ:1.1})$	1	$\mu(\text{НМ:1.1}) = -0.5x + 3$	0

Таблица 4. Значения ФП $\mu(\text{НМ:1.2})$ на участках 1УМ

Участки 1УМ	1	2	3	4	5
Интервал участка на 1УМ	3.0–4.0	4.0–6.0	6.0–8.0	8.0–11.0	11.0–15.0
Значение $\mu(\text{НМ:1.2})$	0	$\mu(\text{НМ:1.2}) = -0.5x - 2$	1	$\mu(\text{НМ:1.2}) = -0.33x + 3.66$	0

Таблица 5. Значения ФП $\mu(\text{НМ:1.3})$ на участках 1УМ

Участки 1УМ	1	2	3
Интервал участка на 1УМ	3.0–8.0	8.0–11.0	11.0–15.0
Значение $\mu(\text{НМ:1.3})$	0	$\mu(\text{НМ:1.3}) = 0.33x - 2.66$	1

Координата ситуационного вектора X_1 , которая определяет “текущую” скорость попутного ветра вдоль ВПП, представлена ЛП = “Попутный ветер” с термами: терм 1.1 “Слабый”, терм 1.2 “Умеренный”, терм 1.3 “Сильный”.

Термам этой ЛП поставлены в соответствие НМ (левый столбец табл. 2):

– НМ:1.1, НМ:1.2, НМ:1.3, определенные на 1УМ, которое представлено точками отрезка прямой. Границы отрезка: левая $1\text{УМ}L = 0.0$, правая $1\text{УМ}R = 15.0$. Размерность точек 1УМ равна м/с;

– НМ:1.1, поставленное в соответствие терму 1.1, имеет функцию принадлежности $\mu(\text{НМ:1.1})$ (табл. 3);

– НМ:1.2, поставленное в соответствие терму 1.2, имеет функцию принадлежности $\mu(\text{НМ:1.2})$ (табл. 4);

– НМ:1.3, поставленное в соответствие терму 1.3, имеет функцию принадлежности $\mu(\text{НМ:1.3})$ (табл. 5).

Координата ситуационного вектора X_2 определяет ускорение торможения, которое было на прошедшей фазе № 3. Она представлена ЛП “Ускорение торможения” с термами: терм 2.1 “Слабое”, терм 2.2 “Среднее”, терм 2.3 “Нормальное”.

Термам этой ЛП поставлены в соответствие НМ (средний столбец табл. 2):

– НМ:2.1, НМ:2.2, НМ:2.3, определенные на 2УМ, которое представлено точками отрезка прямой. Границы отрезка: левая $2\text{УМ}L = -0.0$, правая $2\text{УМ}R = -4.0$. Размерность точек 2УМ равна м/с²;

– НМ:2.1, поставленное в соответствие терму 2.1, имеет ФП $\mu(\text{НМ:2.1})$ (табл. 6);

– НМ:2.2, поставленное в соответствие терму 2.2, имеет ФП $\mu(\text{НМ:2.2})$ (табл. 7);

– НМ:2.3, поставленное в соответствие терму 2.3, имеет ФП $\mu(\text{НМ:2.3})$ (табл. 8).

Координата ситуационного вектора X_3 , определяющая допустимое время ожидания, в течении которого экипаж должен решить задачу “Куда лететь?”, представлена ЛП “Время ожидания” с термами: терм 3.1 “Малое”, терм 3.2 “Среднее”, терм 3.3 “Большое”.

Термам этой ЛП поставлены в соответствие НМ (правый столбец табл. 2):

– НМ:3.1, НМ:3.2, НМ:3.3, определенные на 3УМ, которое представлено точками отрезка прямой. Границы отрезка: левая $3\text{УМ}L = 5.0$, правая $3\text{УМ}R = 30.0$. Размерность точек 3УМ равна мин;

– НМ:3.1, поставленное в соответствие терму 3.1, имеет ФП $\mu(\text{НМ:3.1})$ (табл. 9);

– НМ:3.2, поставленное в соответствие терму 3.2, имеет ФП $\mu(\text{НМ:3.2})$ (табл. 10);

– НМ:3.3, поставленное в соответствие терму 3.3, имеет ФП $\mu(\text{НМ:3.3})$ (табл. 11).

В процедурной матрице знаний определены три процедуры ее оцифровки полученным извне оцифрованным ситуационным вектором.

Процедура М1. Оцифровка активизированной процедурной матрицы знаний. Если поступает извне оцифрованный $SV(X_1, X_2, X_3)$, то для каждого столбца процедурной матрицы знаний, для всех входящих в него НМ определяются значения их функций принадлежности

Таблица 6. Значения ФП $\mu(\text{НМ:2.1})$ на участках 2УМ

Участок 2УМ	1	2	3
Интервал участка на 2УМ	$-0.1 - 2.5$	$-2.5 - 3.0$	$-3.0 - 4.0$
Значение $\mu(\text{НМ:2.1})$	1	$\mu(\text{НМ:2.1}) = 2x + 6$	0

Таблица 7. Значения ФП $\mu(\text{НМ:2.2})$ на участках 2УМ

Участок 2УМ	1	2	3	4	5
Интервал участка на 2УМ	$-0.1 - 1.0$	$-1.0 - 1.5$	$-1.5 - 2.5$	$-2.5 - 3.0$	$-3.0 - 4.0$
Значение $\mu(\text{НМ:2.2})$	0	$\mu(\text{НМ:2.2}) = -2x - 2$	1	$\mu(\text{НМ:2.2}) = -2x - 2$	0

Таблица 8. Значения ФП $\mu(\text{НМ:2.3})$ на участках 2УМ

Участок 2УМ	1	2	3
Интервал участка на 2УМ	$-0.1 - 1.0$	$-1.0 - 1.5$	$-1.5 - 4.0$
Значение $\mu(\text{НМ:2.3})$	0	$\mu(\text{НМ:2.3}) = -2x - 2$	1

Таблица 9. Значения ФП $\mu(\text{НМ:3.1})$ на участках 3УМ

Участок 3УМ	1	2	3
Интервал участка на 3УМ	$5.0 - 8.0$	$8.0 - 12.0$	$12.0 - 30.0$
Значение $\mu(\text{НМ:3.1})$	1	$\mu(\text{НМ:3.1}) = -0.25x + 3$	0

Таблица 10. Значения ФП $\mu(\text{НМ:3.2})$ на участках 3УМ

Участок 3УМ	1	2	3	4	5
Интервал участка на 3УМ	$5.0 - 8.0$	$8.0 - 12.0$	$12.0 - 18.0$	$18.0 - 22.0$	$22.0 - 30.0$
Значение $\mu(\text{НМ:3.2})$	0	$\mu(\text{НМ:3.2}) = 0.25x - 2$	1	$\mu(\text{НМ:3.2}) = -0.25x + 5.5$	0

Таблица 11. Значения ФП $\mu(\text{НМ:3.3})$ на участках 3УМ

Участок УМ	1	2	3
Интервал участка на 3УМ	$5.0 - 18.0$	$18.0 - 22.0$	$22.0 - 30.0$
Значение $\mu(\text{НМ:3.3})$	0	$\mu(\text{НМ:3.3}) = 0.25x - 4.5$	1

НМ в соответствующей точке УМ этого столбца (табл. 1). Так для столбца ЛП “Попутный ветер” значения ФП определяются по табл. 3–5 в точке 1УМ, соответствующей числовому значению координаты X_1 ; для столбца ЛП “Ускорение торможения” значения ФП находятся по табл. 6–8 в точке 2УМ, соответствующей числовому значению координаты X_2 ; для столбца ЛП “Время ожидания” значения ФП – по табл. 9–11 в точке 3УМ, соответствующей числовому значению координаты X_3 .

В столбцах ЛП (табл. 1) все обозначенные НМ замещаются числовыми значениями ФП этих НМ, которые принимает ФП в точке УМ, соответствующей координате оцифрованного ситуационного вектора.

Результат применения процедуры М1 для оцифровки (по оцифрованному ситуационному вектору) столбцов ЛП – оцифрованная процедурная матрица знаний (пример см. в разд. 2).

Процедура М2. Расчет приоритетов прецедентов в оцифрованной процедурной матрице знаний:

а) в каждой строке каждого блока оцифрованной процедурной матрицы знаний определяется строчный \min (согласно операции нечеткого отношения над НМ, стоящими в этой строке блока процедурной матрицы знаний, выполненной в точке УМ, которая выделена оцифрованным ситуационным вектором);

б) в каждом блоке процедурной матрицы знаний из строчных \min выбирается максимальный (\max), согласно операции нечеткого объединения строчных НМ этого блока процедурной матрицы знаний (табл. 1), полученное число – это числовой приоритет прецедента, входящего в соответствующий блок оцифрованной процедурной матрицы знаний.

Результат: определены приоритеты прецедентов, входящих в процедурную матрицу знаний, соответствующие полученному оцифрованному $SV(X1, X2, X3)$.

Процедура М3. Выбор прецедента с наибольшим приоритетом среди приоритетов прецедентов, входящих в процедурную матрицу знаний.

Блок 1.5.3. Оцифровка ситуационного вектора активизированной процедурной матрицы № 5. Оцифровку ситуационного вектора представим для актуализированной матрицы знаний, соответствующей сочетанию НУГ “Попутный ветер” и “Слабое торможение”.

Координаты ситуационного вектора $SV(X1, X2, X3)$ представлены ЛП (табл. 2).

Текущие количественные значения координат ситуационного вектора поступают в базу знаний БОСЭС-П из штатных БЦВМ-алгоритмов ВС: попутный ветер, определенный по воздушной и путевой скорости ВС; ускорение торможения, которое было зафиксировано на прошедшей фазе посадки “Пробег по ВПП с торможением”; допустимое время ожидания на втором круге, рассчитанное по запасу топлива, выделенного на второй круг.

С использованием текущей информации о внешней обстановке, поступившей из штатных БЦВМ-алгоритмов, в блоке 1.5.3 рассчитываются количественные значения координат ситуационного вектора активизированной процедурной матрицы.

Блок 1.5.4. Определение способа противодействия возникшей НУГ по оцифрованной процедурной матрице знаний.

В блок 1.5.4 поступили:

из блока 1.5.2 активизированная процедурная матрица знаний для НУГ “Попутный ветер” и “Слабое торможение” с НМ, поставленными в соответствие термам ЛП ситуационного вектора $SV(X1, X2, X3)$;

из блока 1.5.3 оцифрованный ситуационный вектор $SV(X1, X2, X3)$.

В блоке 1.5.4 по процедуре М1 с использованием процедурной матрицы знаний и оцифрованного ситуационного вектора $SV(X1, X2, X3)$ рассчитывается оцифрованная процедурная матрица знаний:

по процедуре М2 по оцифрованной матрице знаний определяются приоритеты прецедентов, включенных в процедурную матрицу знаний;

по процедуре М3 выбирается прецедент с наибольшим приоритетом.

Выбранный прецедент представляется на ИУП в качестве рекомендации летчику “Используй способ рекомендуемого прецедента для решения своей задачи”.

Возможности БОСЭС-П:

1. БОСЭС-П повышает ситуационную осведомленность экипажа и обеспечивает интеллектуальную поддержку при решении задач оперативного целеполагания в ситуациях, когда на завершающих фазах посадки возникают угрозы: слабое торможение на ВПП, попутный ветер, боковой ветер, “козление”.

2. БОСЭС-П может работать на борту любых гражданских ВС, получая информацию от штатных бортовых измерительных систем ВС и от курсоглиссадного маяка назначенного аэродрома посадки.

3. Для повышения ситуационной осведомленности экипажа БОСЭС-П:

— с момента пересечения ВС входного створа ВПП постоянно определяется размер использованного отрезка ВПП до момента схода ВС с ВПП или до момента ухода ВС с курса ВПП, наступающего после взлета ВС с прерванного пробега;

— на фазе посадки № 3 с момента начала “устойчивого торможения” постоянно предъявляет экипажу информацию об отрезке ВПП, необходимом для достижения ВС скорости схода с ВПП и о необходимом отрезке ВПП для достижения ВС скорости отрыва;

— на фазе посадки № 4 с момента начала “устойчивого разгона” постоянно предъявляет экипажу информацию об отрезке ВПП, необходимом для достижения ВС скорости отрыва ВС от ВПП.

4. Для повышения ситуационной уверенности экипажа БОСЭС-П решает задачу оперативного целеполагания, в результате чего:

— на фазах посадки № 1 и 2 после принятия летчиком решения “Уйти с текущей фазы посадки” вырабатывается рекомендация “Второй круг” или “Запасной аэродром”;

— на фазе посадки № 3 рекомендуется экипажу “Прекрати торможение. Взлетай”;

— на фазе посадки № 5 предлагается экипажу “Второй круг” или “Запасной аэродром”.



Рис. 1. Кабина МС-21 на стенде КБО МС-21.

Для предъявления Заказчику возможности создания базы знаний такой БОСЭС-П и технологии ее исследовательских испытаний ниже в разд. 2 представлен ее действующий демонстрационный образец БОСЭС-П (02.2), база знаний которого содержит ряд значимых блоков базы знаний БОСЭС-П.

2. Действующий демонстрационный образец БОСЭС-П (02.2). Разработка базы знаний БОСЭС-П (02.2) прошла два этапа, реализованные соответственно в двух версиях ее базы знаний:

- версия (01.2), содержащаяся в образце БОСЭС-П (01.2);
- версия (02.2), содержащаяся в образце БОСЭС-П (02.2).

Базы знаний обоих образцов ориентированы на работу: а) в штатной бортовой информационной среде ВС МС-21, б) в условиях, когда отсутствуют непосредственные угрозы на фазах посадки № 1 и 2, а на фазах № 3–5 из перечня угроз, заявленных в БОСЭС-П, могут появляться только угрозы “Попутный ветер” и “Слабое торможение”.

Оба образца были погружены в программную среду стенда КБО МС-21, на котором прошли их исследовательские испытания с профессиональным летчиком М.П. Безменом, выполнившим более 100 зачетных посадок на упомянутом стенде (рис. 1).

База знаний БОСЭС-П (01.2) включает в себя следующие блоки:

- 1) координации ВС относительно входного створа ВПП (блок из базы знаний БОСЭС-П);
- 2) блоки баз знаний фаз посадки № 3 и 4 (блоки из базы знаний БОСЭС-П);
- 3) диспетчер версии (01.2), вырабатывающий признаки наступивших фаз посадки ВС.

БОСЭС-П (01.2) прошла исследовательские испытания на стенде КБО МС-21, результаты которых описаны в работах [16, 17].

База знаний БОСЭС-П (02.2) включает в себя следующие блоки:

- 1) координации ВС относительно входного створа ВПП (блок из базы знаний БОСЭС-П, отработанный в исследовательских испытаниях БОСЭС-П (01.2));
- 2) блоки баз знаний фаз посадки № 3 и 4 (блоки из базы знаний БОСЭС-П), отработанные в исследовательских испытаниях БОСЭС-П (01.2);
- 3) блоки фазы посадки № 5 с процедурами решения задач по прецедентам (блоки из базы знаний БОСЭС-П);
- 4) информационное табло экспериментатора версии (02.2), на которое в реальном времени выдаются информация и рекомендации летчику на фазах посадки № 3–5;

Таблица 12. Информационное сопряжение БОСЭС-П (02.2) с выносным информационным табло экспериментатора стенда (см. табл. 13)

Появляющиеся тексты на информационном табло эксперимента	Признаки появления текста
Выйди на “полку”	$P_{\phi} = 3$ и $P_a = 0$, $P_{\phi} = 4$ и $P_a = 0$
Нет рекомендаций	$P_{\phi} = 3$ и $P_{взл} = 0$, $P_{\phi} = 4$ и $P_{взл} = 0$
Взлетай	$P_{\phi} = 3$ и $P_{взл} = 1$
Второй круг	$P_{\phi} = 5$ и $P_{п.отр} = 1$
Запасной аэродром	$P_{\phi} = 5$ и $P_{п.отр} = 0$
Фаза посадки № 3 “Пробег по ВПП с торможением”	$P_{\phi} = 3$
Фаза посадки № 4 “Пробег по ВПП с разгоном”	$P_{\phi} = 4$
Фаза посадки № 5 “Взлетай”	$P_{\phi} = 5$

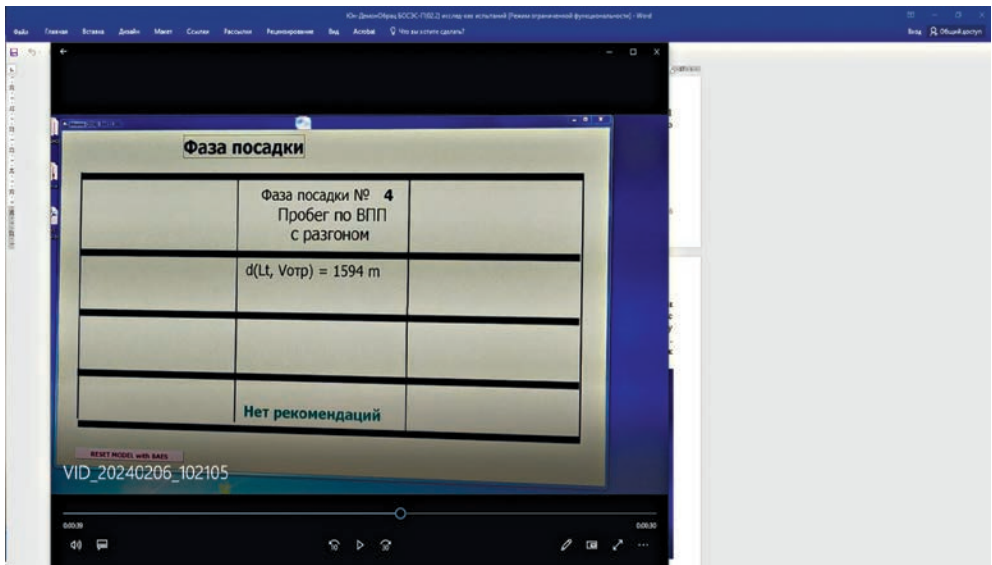


Рис. 2. Вид информационного табло экспериментатора на фазе посадки № 3 “Пробег по ВПП с торможением”.

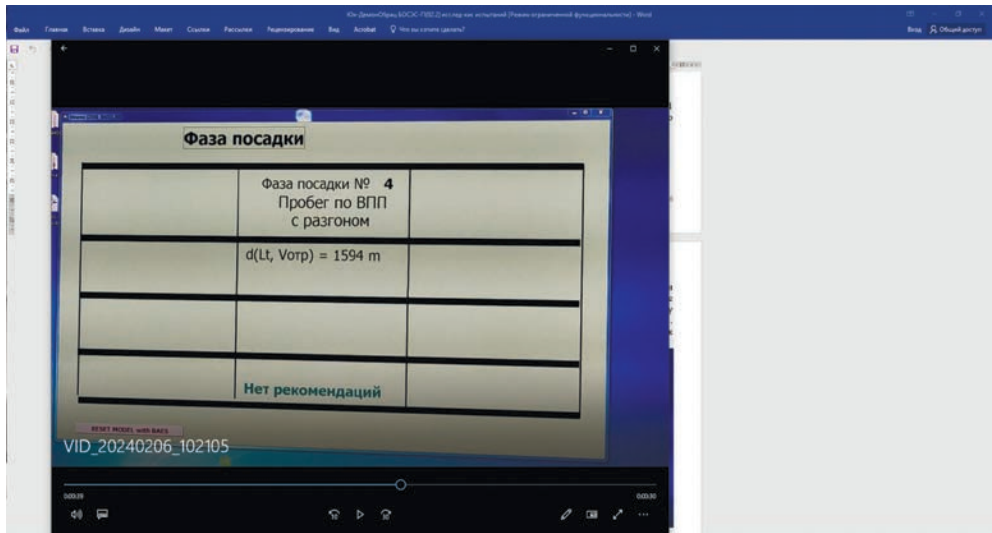


Рис. 3. Вид информационного табло экспериментатора на фазе посадки № 4 “Пробег по ВПП с разгоном”.

5) диспетчер версии (02.2), вырабатывающий признаки наступивших фаз посадки и обеспечивающий связь БОСЭС-П (02.2) с информационным табло версии (02.2) (табл. 12).

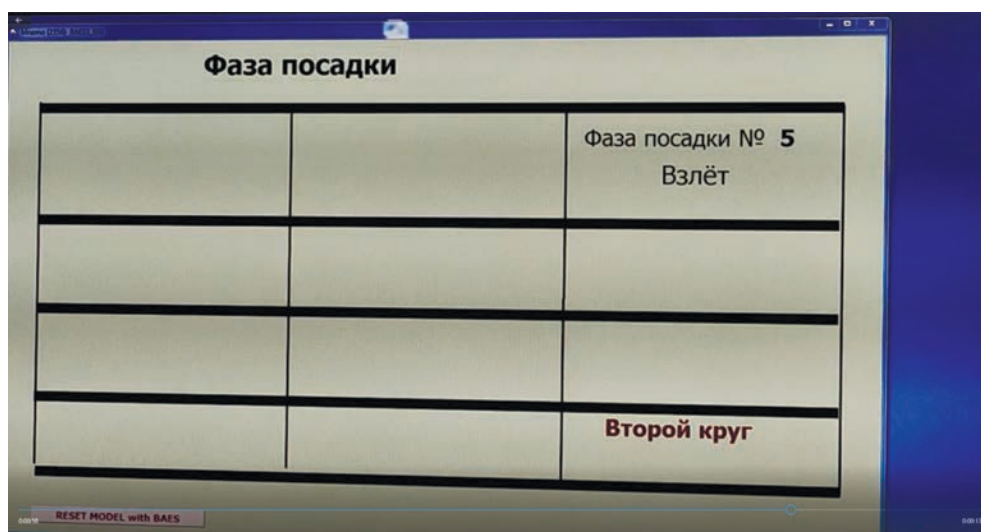


Рис. 4. Вид информационного табло экспериментатора на фазе посадки № 5 “Взлёт”.

Таблица 13. Стенд КБО МС-21: выносное табло для экспериментатора с информацией из БОСЭС-П (02.2) на фазах посадки № 3–5

Строки табло	Фаза посадки № 3	Фаза посадки № 4	Фаза посадки № 5
1	“Пробег по ВПП с торможением”	“Пробег по ВПП с разгоном”	“Взлет”
2	$\Delta(L(t), V_{отр})$ – число	$\Delta(L(t), V_{отр})$ – число, если $P_a = 1$ “Выйди на “полку”, если $P_a = 0$ ”	–
3	$\Delta(L(t), V_{сход})$ – число, если $P_a = 1$ “Выйди на полку”, если $P_a = 0$ ”	–	–
4	“Взлетай”, если $P_{взл} = 1$ Нет рекомендаций, если $P_{взл} = 0$	Нет рекомендаций	“Второй круг”, если $P_{п.отр} = 1$ “Запасной аэродром”, если $P_{п.отр} = 0$

В табл. 12 обозначены: P_ϕ – признак фазы посадки, P_a – признак “полки” (признак того, что ускорение a , вышло на “полку”), $P_{взл}$ – признак взлета ВС, $P_{п.отр}$ – признак принятия решения летчиком после отрыва ВС от ВПП.

Информация и рекомендации летчику представлялись на выносном информационном табло экспериментатора (табл. 13). Его мог видеть только экспериментатор, который, сидя в кабине рядом с летчиком, озвучивал ему появляющуюся на табло информацию.

Предполагаемые информационные кадры БОСЭС-П (02.2), которые будут предъявляться экипажу ВС, показаны на рис. 2–4.

В табл. 13 экспериментатору демонстрируются текущие прогнозные оценки отрезков не-востребованной ВПП:

а) на фазе посадки № 3:

– для достижения ВС скорости схода: $V_{сход}$ с ВПП ($\Delta(L(t), V_{сход}) = L_{ВПП} - (L_{исп} + L(t, V_{сход}))$), где $L_{ВПП}$ – длина ВПП, $L_{исп}$ – уже использованный ВС участок ВПП;

– для достижения ВС скорости $V_{отр}$ от ВПП, если бы в текущий момент летчик принял решение “Прекратить торможение. Взлетать”: $\Delta(L(t), V_{отр}) = L_{ВПП} - (L_{исп} + L(t, V_{отр}))$, где $L_{ВПП}$ – длина ВПП, $L_{исп}$ – уже использованный ВС отрезок ВПП;

б) на фазе посадки №4: $\Delta(L(t), V_{отр}) = L_{ВПП} - (L_{исп} + L(t, V_{отр}))$.

2.1. Результаты исследовательских испытаний блоков базы знаний БОСЭС-П (02.2), обеспечивающих ситуационную осведомленность экипажа. Эти блоки работают на фазах посадки № 3 и 4, на которых могут возникнуть угрозы “Попутный ветер” и/или “Слабое торможение”.

2.1.1. Результаты исследовательских испытаний БОСЭС-П (02.2) на фазе посадки № 3. На этой фазе в каждый момент пробега ВС с торможением производится прогноз потребных участков ВПП, необходимых ВС:

Таблица 14. Фаза посадки № 3. Сравнение текущих прогнозных использованных отрезков ВПП (отсчет от входного створа ВПП), необходимых ВС для достижения скорости схода $V_{сход}$

Потребная ВПП для достижения ВС скорости схода с ВПП (стенд МС-21): $G_{псд} = 69.1 \text{ т}$, $\kappa_{сш} = 0.7$, $V_{сход} = 30 \text{ узлов}$			
Текущее время, с	Прогноз использованной ВПП для $V_{сход}$, м	Текущая $V(t)$, узлы	Фактически использованная часть ВПП, м
132.8	624.2	106.3	993.96
135.5	975.5	90.4	
138.5	961.4	70.3	
141.4	981.0	50.9	
144.8	994.8	30.1	

Таблица 15. Фаза посадки № 3 с переходом на фазу посадки № 4: сравнение прогнозных отрезков ВПП, необходимых ВС для достижения скорости отрыва на этих фазах посадки, с фактически использованным отрезком ВПП с момента отрыва

Потребная ВПП для достижения скорости отрыва (стенд МС-21): $G_{псд} = 69.1 \text{ т}$, $\kappa_{сш} = 0.7$, $V_{отр} = 155 \text{ узлов}$			
Фаза посадки № 3. Принятие летчиком решения “Взлетать”			
Текущее время, с	Прогноз использованной ВПП для отрыва, м	Текущая $V(t)$, узлы	Фактически использованная часть ВПП в момент отрыва ВС от ВПП, м
0 (= 154.4)	3105	Скорость принятия решения 154.4	—
Фаза посадки № 4. Реализуется решение “Взлетать”			
20.8	2914.2	105.8	—
26.5	2948.4	140.8	—
29.2	2983.3	154.4	2977.7

— для достижения скорости схода с ВПП;

— для достижения скорости отрыва ВС от ВПП, если бы летчик в этот момент пробега с торможением принял решение “Прекратить торможение. Взлетать”.

Оценим по результатам исследовательских испытаний БОСЭС-П (02.2) на стенде КБО МС-21 точность прогноза упомянутых потребных участков ВПП. В табл. 14 показаны результаты прогноза участка ВПП, необходимого для достижения ВС скорости схода с ВПП.

Сравнение величин (второй левый столбец табл. 14) текущих прогнозных значений отрезков ВПП, необходимых для достижения ВС скорости схода с ВПП, с фактической величиной использованного участка ВПП на момент достижения ВС скорости схода, равной 993.96 м, показывает приемлемую точность прогнозных значений в каждый момент нахождения ВС на фазе посадки № 3.

На фазе посадки № 3 в каждый момент пробега ВС по ВПП на информационном табло экспериментатора появляется информация, представленная на рис. 2.

2.1.2. Результаты исследовательских испытаний БОСЭС-П (02.2) на фазе посадки № 4. В табл. 15 приведены результаты работы блока “Определение на фазе посадки “Пробег по ВПП с торможением” текущего отрезка ВПП, необходимого для достижения ВС скорости отрыва в предположении, что экипаж в этот момент времени примет решение “Прекратить торможение. Взлетать”.

В блоке фазы посадки № 4 делается текущий прогноз участка ВПП, необходимого для достижения ВС скорости отрыва. Прогноз делается процедурой, использующей экспериментальные данные по фактическим отрезкам ВПП, которые нужны для достижения скорости отрыва ВС от ВПП $L(t, V_{отр})$. Эти данные получены в исследовательских испытаниях для различных скоростей ВС, на которых летчик принимал решения “Прекратить торможение. Взлетать” при различных коэффициентах сцепления $\kappa_{сш}$ и различных посадочных весах $G_{псд}$ ВС. Упомянутой процедурой в каждый момент пробега ВС с торможением определяются текущие отрезки ВПП $L(t, V_{отр})$, необходимые для достижения ВС скорости отрыва $V_{отр}$. Отрезки $L(t, V_{отр})$ отсчитываются от входного створа ВПП (табл. 15).

Таблица 16. Фаза посадки № 3

t, c	$\Delta(L(t), V_{сход}), м$	Оповещение летчику на табло	V_x , узлов	P_a -признак “полки”
145.74	—	“Выйди на “полку”	129	Касание, $P_a = 0$
151.85	—	“Выйди на “полку”	120.18	$P_a = 0$
151.98	—	“Выйди на “полку”	119.77	$P_a = 0$
152.11	2065.90	Нет	119.35	$P_a = 1$
167.31	2390.66	Нет	50.05	$P_a = 1$
168.36	2077.51	Фаза полета № 4	45.1	Сход с ВПП

В табл. 15 показаны результаты исследовательских испытаний БОСЭС-П (02.2) на стенде КБО МС-21 для случая, когда летчик на фазе посадки № 3 на скорости $V_{реш} = 90$ узлов принял решение “Прекратить торможение. Взлетать”. В базе знаний БОСЭС-П (02.2) момент принятия летчиком этого решения зафиксирован на 154,4-й с, а оценка величины прогнозного отрезка ВПП, необходимого ВС для достижения скорости отрыва $V_{отр} = 155,4$ узла, составила 3105 м (верхняя строка табл. 15).

Результаты текущего прогноза участка ВПП, необходимого ВС для достижения скорости отрыва, приведены во втором слева столбце табл. 15. Сравнение данных этого столбца — прогнозные величины 2914.2–2983.3 отрезков ВПП, которые нужны для достижения ВС скорости отрыва на фазе посадки № 4, с величиной аналогичного отрезка ВПП 3105 м, полученного на фазе посадки № 3 в момент принятия решения летчиком, убеждают, что они приемлемо близки. Также они близки и к отрезку ВПП 2977.7 м, зафиксированному в эксперименте в момент достижения ВС скорости отрыва 154 узла.

На фазе посадки № 4 в каждый момент пробега ВС по ВПП на информационном табло экспериментатора появляется информация, показанная на рис. 3.

2.1.3. Результаты исследовательских испытаний БОСЭС-П (02.2) по оценке времени отсутствия прогноза достаточности ВПП для достижения ВС скорости схода с ВПП на фазе посадки № 3. На фазе посадки № 3 прогнозная оценка достаточности величины ВПП для достижения ВС скорости схода с ВПП осуществляется только с момента выхода ускорения торможения на “полку” в базе знаний БОСЭС-П (02.2), что определяется появлением признака $P_a = 1$.

Эксперимент от 22.05.2023 для оценки времени отсутствия прогноза выполнялся при следующих условиях: $L_{ВПП} = 3996$ м — длина ВПП; $V_{х сход} = 45$ узлов — скорость схода с ВПП, $k_{сц} = 0.7$ — коэффициент сцепления, $G_{псд} = 69.1$ т — вес ВС при посадке.

В табл. 16 представлены экспериментальные данные, полученные на фазе посадки № 3. Здесь $\Delta L(t, V_{сход})$ — значения запаса оставшейся ВПП на момент схода ВС с ВПП, P_a — признак постоянства ускорения торможения (признак “полки”), $P_a = 1$, если $a_v < -1.61$, где a_v — ускорение торможения; V_x — скорость ВС.

Продолжительность времени отсутствия прогноза значения запаса оставшейся ВПП для достижения ВС скорости схода с ВПП $V_{сход} = 44.60$ узлов (момент касания ВС ВПП $t = 145.74$ с — момент появления признака $P_a = 1$ при $t = 152.11$) составляет $152.11 - 145.74 = 6.37$ с.

Продолжительность участка времени от момента касания ВС ВПП до момента достижения ВС скорости схода с ВПП (фаза посадки № 3) составляет $168.36 - 145.74 = 22.62$ с. При этом 28.2% этого времени у летчика нет информации о достаточности ВПП для торможения ВС до скорости схода. На табло его просят “Выйди на “полку” ускорения торможения”.

2.2. Результаты исследовательских испытаний блоков базы знаний БОСЭС-П (02.2), относящихся к решению задач “Оперативное целеполагание”. Задачи оперативного целеполагания в базе знаний БОСЭС-П (02.2) возникают на фазах посадки № 3 и 5 и решаются там по прецеденту [3]. Покажем решение этой задачи только на фазе посадки № 5.

Последовательно в базе знаний БОСЭС-П (02.2) работают следующие блоки (нумерации общих блоков баз знаний БОСЭС-П (02.2) и БОСЭС-П естественно совпадают):

блоки 1.5.1 и 1.5.2 в исследовательских испытаниях представляются сразу конечным результатом — активизированной процедурной матрицей знаний, относящейся к непосредственным угрозам “Попутный ветер” и/или “Слабое торможение”. Естественно, что исследовательские испытания блоков фазы посадки № 5 проводились уже при выбранной из блока

Таблица 17. Оцифровка координат ситуационного вектора SV : $X1$, $X2$, $X3$ (вариант для отладки на персональном компьютере)

Скорость попутного ветра $X1$, м/с	Ускорение торможения $X2$, м/с ²	Время ожидания $X3$, мин
$УМ = (3-15)$	$УМ = (-0.1 - 4)$	$УМ = (5-30)$
5	-3	20
8	-2	15
10	-1	30
12	-0,5	10

Таблица 18. Оцифровка ситуационного вектора (вариант для стенда КБО МС-21)

Текущая скорость попутного $X1$, м/с	Ускорение торможения на “полке” прерванного пробега $X2$, м/с ²	Допустимое время ожидания на втором круге $X3$, мин
5	-3	20

1.5.1 процедурной матрицы знаний № 5, разработанной для НУГ “Попутный ветер” и/или “Слабое торможение”;

оцифрованный ситуационный вектор, который должен поступать извне в БОСЭС-П (02.2), перед экспериментом сразу вводится в блок 1.5.3.

Приведем соответствующие результаты исследовательских испытаний других блоков.

2.2.1. Результаты моделирования процедуры “Оцифровка ситуационного вектора” (блок 1.5.2 в базе знаний БОСЭС-П (02.2)). Динамическое моделирование оцифровки ситуационного вектора в блоке 1.5.2 не проводилось. Задавались таблицы результатов оцифровки для последующего их использования при математическом моделировании работы блока 1.5.3 (табл. 17) и для моделирования работы блока 5.3 на стенде КБО МС-21 (табл. 18) в составе базы знаний БОСЭС-П (02.2).

2.2.2. Результаты исследовательских испытаний на стенде КБО МС-21 блока 1.5.3. Блок работал в составе остальных блоков базы знаний БОСЭС-П (02.2). В него поступили:

– из блока 1.5.1 активизированная процедурная матрица знаний для непосредственной угрозы (табл. 1);

– из блока 1.5.2 оцифрованный ситуационный вектор SV ($X1 = 5$, $X2 = -3$, $X3 = 20$).

В блоке 1.5.3. активизировалась: а) процедура М1 оцифровки процедурной матрицы по оцифрованному ситуационному вектору SV ($X1 = 5$, $X2 = -3$, $X3 = 20$) для стенда КБО МС-21, затем процедура М2 расчета приоритетов прецедентов в оцифрованной процедурной матрицы знаний.

Результат: приоритеты прецедентов для условий, описанных оцифрованным ситуационным вектором (табл. 19).

Процедура М3. Выбрать прецедент с наибольшим приоритетом. Выбран прецедент “Второй круг”. Его приоритет 0.2. Выбранный прецедент представляется на ИУП в качестве рекомендации летчику для реализации.

2.2.3. Результаты математического моделирования работы блока 1.5.3. Для фазы посадки № 5 проведено математическое моделирование работы процедуры “Решение задачи по прецеденту”. Результаты моделирования для различных условий внешней обстановки (трех оцифровок ситуационного вектора) показаны в табл. 20.

Для внешней обстановки, характеризуемой оцифрованным ситуационным вектором $SV = (X1 = 5, X2 = -3, X3 = 20)$, БОСЭС-П (02.2) рекомендовала экипажу “Второй круг”, а для внешней обстановки, характеризуемой оцифрованным ситуационным вектором $SV = (X1 = 12, X2 = -0.5, X3 = 10)$, “Запасной аэродром” (табл. 20).

На фазе посадки № 5 с момента отрыва ВС от ВПП на информационном табло экспериментатора появляется информация, показанная на рис. 4.

Примечание 4. Исследовательские испытания БОСЭС-П (02.2) на стенде МС-21 выявили необходимость [6]:

– провести на фазе посадки № 3 доработку процедуры выработки рекомендации экипажу “Прекратить торможение. Взлетай” (задача оперативного целеполагания) с учетом особенностей торможения ВС летчиком, приводящим к немонотонному изменению прогнозных значений потребных отрезков ВПП для достижения ВС скорости схода с ВПП;

Таблица 19. Оцифрованная процедурная матрица знаний для НУГ “Попутный ветер” и “Слабое торможение”: процедуры матрицы по ситуационному вектору $SV(X1 = 5, X2 = -3, X3 = 20)$: приоритеты прецедентов. Через УМ (*) обозначено декартово произведение $1НМ \times 2НМ \times 3НМ$

Оцифрованная процедурная матрица знаний для НУГ “Попутный ветер” и “Слабое торможение”							
Номер блока матрицы	Номер строки блока	Ситуационный вектор $SV(X1, X2, X3)$			Операция нечеткого отношения по НМ строки. Результат: строчные НМ строк матрицы. УМ (*)	Операция нечеткого объединения строчных НМ в блоке. Результат: НМ блоков матрицы. НМ прецедентов. УМ (*)	Прецеденты
		$X1 = 5 \text{ м/с}$ ЛП “Попутный ветер” Терм 1.1 Терм 1.2 Терм 1.3 НМ:1.1 НМ:1.2 НМ:1.3 1УМ	$X2 = -3 \text{ м/с}^2$ ЛП “Ускорение торможения” Терм 2.1 Терм 2.2 Терм 2.3 НМ: 2.1 НМ:2.2 НМ:2.3 2УМ	$X3 = 20 \text{ мин}$ ЛП “Время ожидания” Терм 3.1 Терм 3.2 Терм 3.3 НМ: 3.1 НМ: 3.2 НМ: 3.3 3УМ			
1	1.1	Терм 1.1 НМ:1.1 1.0	Терм 2.2 НМ:2.2 0.0	Терм 3.3 НМ:3.3 0.5	0.0	0.2	Приоритет прецедента “Второй круг” 0.2
	1.2	Терм 1.2 НМ:1.2 0.4	Терм 2.3 НМ:2.3 1.0	Терм 3.2 НМ:3.2 0.2	0.2		
2	2.1	Терм 1.3 НМ:1.3 0.0	Терм 2.1 НМ:2.1 0.0	Терм 3.1 НМ:3.1 0.0	0.0	0.0	Приоритет прецедента “Запасной аэродром” 0.0
	2.2	Терм 1.2 НМ:1.2 0.4	Терм 2.2 НМ:2.2 0.0	Терм 3.1 НМ:3.1 0.0	0.0		

Таблица 20. Фаза посадки № 5. Результаты математического моделирования БОСЭС-целесолагание на фазе посадки № 5 (до схода ВС с курса ВПП)

Координаты ситуационного вектора SV (обстановка-прецеденты)				
Варианты математического моделирования	Скорость попутного ветра $X1$, м/с. УМ = (3–15)	Ускорение торможения $X2$, м/с ² . УМ = (–0.1 –4.0)	Время ожидания $X3$, с. УМ = (5–30)	Рекомендация летчику
1	5	–3	20	Второй круг
2	8	–2	15	Второй круг
3	12	–0.5	10	Запасной аэродром

– уменьшить на фазах посадки № 3 и 4 времена “молчания БОСЭС- П (02.2)” (на этих отрезках времени прогнозные значения необходимых отрезков ВПП отсутствуют на ИУП).

Возможности БОСЭС-П (02.2):

1. БОСЭС-П (02.2) является продуктом второго этапа разработки базы знаний БОСЭС-П, функционирующем в бортовой информационной среде самолета МС-21 (версия бортовой информационной среды, реализованной на стенде КБО МС-21).

2. БОСЭС-П (02.2) успешно прошла исследовательские испытания на стенде КБО МС-21 на фазах посадки: № 3–5 при появлении непосредственных угроз “Попутный ветер” и/или “Слабое торможение” на этих фазах посадки. На стенде было совершено больше сотни зачетных посадок, выполненных профессиональным летчиком, имеющим опыт полетов на гражданских ВС.

3. В базе знаний БОСЭС (П2.2) с момента пролета ВС входного створа ВПП:
– постоянно определяется размер использованного ВС отрезка ВПП;
– обеспечивается ситуационная осведомленность экипажа на фазах посадки № 3 и 4, где могут возникать непосредственные угрозы “Слабое торможение” и/или “Попутный ветер”;
– вырабатываются рекомендуемые экипажу для реализации решения задач оперативного целеполагания, возникающие при появлении названных выше угроз на фазах посадки № 3 и 4.

4. В этих условия БОСЭС-П (02.2) выступает как действующий демонстрационный образец БОСЭС-П, использующий только штатную бортовую информацию ВС и информацию от курсоглиссадного маяка выбранного аэродрома посадки. Исследовательские испытания БОСЭС-П (02.2) подтвердили работоспособность всех функционирующих в ее базе знаний процедур: решение задачи по прецеденту на фазе посадки № 5 (подтверждая тем самым работоспособность метода решения задач по прецеденту, который также применяется в БОСЭС-П на фазах посадки № 1, 2) и процедур на фазах посадки № 3 и 4, где решение задач базируется на использовании математических моделей пробега ВС по ВПП и логического вывода. Работающая на борту ВС БИС-ТУ, рассчитана на функционирование в условиях, когда из внешних угроз на завершающих фазах посадки ВС появляются только непосредственные угрозы “Попутный ветер” и “Слабое торможение” и упомянутые угрозы могут возникать только на фазах посадки № 3–5.

Заключение. БИС-ТУ оказывают интеллектуальную поддержку экипажу ВС в ситуациях, когда в процессе выполнения полетного задания появляются непосредственные угрозы. Они повышают качество принимаемых летчиком решений, уменьшая при этом его операционную нагрузку. Базы знаний каждой такой интеллектуальной системы ориентированы на использования процедур и текущей информации, облик которых определяется спецификой того фрагмента предметной области, в котором должна работать эта система. При этом выработанные интеллектуальной системой решения, которые она предлагает экипажу реализовать, должны быть понятны экипажу, а процедуры их выработки в базе знаний БИС-ТУ должны быть доступны пользователям для критического анализа. Представленная БОСЭС-П – первая из БИС-ТУ, разработка базы знаний которой дошла до создания ее демонстрационного образца БОСЭС-П (02.2), прошедшего исследовательские испытания в бортовой информационной среде реального ВС на стенде полунатурного моделирования с профессиональным летчиком.

БОСЭС-П может работать на борту любых гражданских ВС, получая штатную информацию от бортовых измерительных систем ВС и курсоглиссадного маяка выбранного аэродрома посадки. На завершающих фазах посадки БОСЭС-П обеспечивает интеллектуальную поддержку экипажу при противодействии возникшим внешним угрозам – попутный ветер, слабое торможение, боковой ветер, “козление”.

База знаний БОСЭС-П включает в себя:

– базу знаний ИИС СОЭ, информирующую экипаж о “точках невозврата”, при появлении названных выше угроз, использующую для этого математические модели торможения и разгона ВС по ВПП и текущие измерения скорости пробега ВС;

– базу знаний БОСЭС-целеполагание, вырабатывающую рекомендации экипажу по способу противодействия возникшей внешней угрозе на фазах посадки № 1, 2, 5 методом решения задачи по прецеденту, а на фазе посадки № 3 – с использованием информации с ИИС СОЭ и логического вывода.

Для создания практически значимой БОСЭС-П в работе представлен ее демонстрационный образец БОСЭС-П (02.2) с версией базы знаний (02.2), которая ориентирована на функционирование в условиях появления только внешних угроз “Попутный ветер” и/или “Слабое торможение” и только на фазах посадки № 3–5. База знаний БОСЭС-П (02.2) на этих фазах посадки идентична базе знаний этих фаз в БОСЭС-П.

Демонстрационный образец БОСЭС-П (02.2) адаптирован к штатной бортовой информационной среде самолета МС-21 и погружен в программную среду стенда КБО МС-21, на котором он прошел исследовательские испытания с профессиональным летчиком.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Концепция интеллектуальной поддержки тактических решений экипажей (командиров групп) авиационных комплексов при выполнении боевых задач. Монино: ВУНЦ ВВС “ВВА”, 2010. 17 с.
2. Федунов Б.Е. Бортвые интеллектуальные системы тактического уровня для антропоцентрических объектов (примеры для пилотируемых летательных аппаратов). М.: Де Либри, 2018. 246 с.
3. Федунов Б.Е. Решение задач по прецеденту в базах знаний бортовых интеллектуальных систем тактического уровня на этапах выполнения миссии подвижным объектом // Изв. РАН. ТиСУ. 2023. № 1. С. 137–147.
4. Федунов Б.Е., Юневич Н.Д. Оперативный способ решения задач многокритериального выбора альтернативы в базах знаний бортовых оперативно советующих экспертных систем // Изв. РАН. ТиСУ. 2021. № 3. С. 111–128.
5. Федунов Б.Е. Интеллектуальные агенты в базах знаний бортовых оперативно советующих экспертных системах типовых ситуаций функционирования антропоцентрического объекта // Изв. РАН. ТиСУ. 2019. № 6. С. 90–102.
6. Федунов Б.Е. Бортвые оперативно советующие экспертные системы тактического уровня для пилотируемых летательных аппаратов – объекты разработки и эксплуатации // Изв. РАН. ТиСУ. 2016. № 4. С. 113–132.
7. Жмеренецкий В.А., Полулях К.Д., Акбашев О.Ф. Активное обеспечение безопасности полета летательного аппарата. Методология, модели, алгоритмы. М.: ЛЕНАНД, 2019. С. 320.
8. Чунтул А.В. Современные аспекты включения технологий человеческого фактора в разработку бортовых интеллектуальных систем // Тез. докл. V Всероссийск. науч.-техн. конф. М.: ГосНИИАС “Моделирование авиационных систем”, 2023. С. 361–362.
9. Эргономика в системах проектирования и испытаний вертолетов и тренажерах “Ми”: Т.: Технологии интеллектуальной поддержки экипажей вертолетов // Под ред. Б.Е. Федунова, А.В. Чунтула. М.: Когито-центр, 2029. 167 с.
10. Система автоматического управления самолетом при заходе на посадку. Патент RU № 2012 150 114.
11. Система автоматического управления боковым движением самолета при заходе на посадку. Патент RU № 2662 576 С1.
12. Способ посадки самолета. Патент RU № 2055 785 С1.
13. Бондарев В.Г., Бондарев В.В., Лопаткин Д.В. Автоматическая посадка летательного аппарата // Вестн. ВГУ. Сер. Системный анализ и информационные технологии. 2018. № 2. С. 44–51.
14. Себряков Г.Г., Мужичек С.М., Тестова Т.М., Маслова Л.А., Ефанов В.В. Об интегрированной бортовой системе безопасного наземного движения летательного аппарата на этапах взлета и посадки // Тр. ГосНИИАС. 2022. Вып. 4 (59). С. 36–45.
15. Себряков Г.Г., Мужичек С.М., Тестова Т.М., Маслова Л.А. Методика предупреждения выкатывания летательного аппарата со взлетно-посадочной полосы и предупреждения его повреждения при движении по аэродрому // Тр. ГосНИИАС. 2022. Вып. 4 (59). С. 46–53.
16. Аспидова А.М., Еремин А.И., Федунов Б.Е. Интеллектуальная поддержка решения задачи оперативного целеполагания экипажем самолета на этапе “Посадка”: коллизия “Пробег по ВПП – угроза “Слабое торможение” // Изв. РАН. ТиСУ. 2022. № 6. С. 133–149.
17. Федунов Б.Е. Бортвые интеллектуальные системы тактического уровня на гражданских воздушных судах // Тез. докл. Междунар. науч.-техн. конф., посвященной 100-летию отечественной гражданской авиации “Гражданская авиация на современном этапе развития науки, техники и общества”. М.: ИД Академии Жуковского, 2023. С. 463, 464.
18. Заде Л. Понятие лингвистической переменной и ее применение к принятию приближенных решений. М.: Радио и связь, 1976.