

**Согласование технического и биологического сегментов  
эргатической системы «самолет-летчик» с использованием  
нейросетевого подхода**

**Евдокименков В.Н.\*, Ким Р.В.\*\*, Якименко В.А.\*\*\***

*Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), МАИ, Волоколамское шоссе, 4, Москва, А-80, ГСП-3, 125993, Россия*

\*e-mail: [evn@netland.ru](mailto:evn@netland.ru)

\*\*e-mail: [romanykim@yandex.ru](mailto:romanykim@yandex.ru)

\*\*\*e-mail: [whyacehka@gmail.com](mailto:whyacehka@gmail.com)

**Аннотация**

В статье рассмотрены методы оперативного контроля и послеполетного анализа действий летчика, в основе которых лежит использование индивидуально-адаптированной нейросетевой модели его деятельности, отражающей особенности управляющих реакций при выполнении типовых полетных режимов. Такие модели позволяют осуществлять прогноз точности приведения самолета в терминальную точку траектории на основе текущего вектора состояния. Структура и параметры нейросетевых моделей определяются на основе обработки данных предыдущих полетов, выполненных конкретным летчиком на конкретном самолете, и непрерывно уточняются по мере поступления новых данных. Приведены результаты апробации разработанных алгоритмов на примере обработки результатов выполнения посадки на аппаратно-программном симуляторе самолета МиГ-АТ.

**Ключевые слова:** модель летчика, контроль деятельности летчика, система поддержки действий летчика, нейронная сеть, многослойный персептрон.

## **Введение**

Задачи оперативного контроля и послеполетного анализа управляющих действий летчика играют одну из важнейших ролей в области повышения безопасности полетов и эффективности использования средств авиационной техники. На сегодняшний день тенденции развития в области авиации характеризуются непрерывным расширением круга задач, решаемых экипажем современного летательного аппарата (ЛА). Это обстоятельство наряду с такими факторами, как повышение технических характеристик ЛА и усложнение комплекса бортового оборудования приводит к повышению психофизиологической нагрузки на летчика в процессе полета и определяет повышенные требования к его подготовке. В работах [1-3] отмечено, что именно согласование технического и биологического сегментов эргатической системы «самолет-летчик» является той проблемой, успешное решение которой позволило бы повысить уровень безопасности и эффективности использования современных ЛА.

В настоящей статье предложен подход к решению задачи согласования, путем повышение эффективности управляющих действий летчика на основе индивидуально-адаптированного оперативного контроля и послеполетного анализа его управляющих действий. Связь задач оперативного контроля и послеполетного анализа с проблемой согласования технического и биологического сегментов определяется тем, что летчик (биологический сегмент) является по сути основным элементом, оказывающим влияние на самолет (технический сегмент), осуществляя

непрерывное управление им. При этом, поскольку объектом и контроля, и анализа является одна и та же сущность – действия летчика при управлении самолетом, целесообразно рассматривать совместное решение этих задач. Это обстоятельство определяет актуальность разработки общих подходов, методов, алгоритмов и моделей, которые могли бы служить базой для решения вышеперечисленных задач.

Ранее в работах авторов [4-7] была сформулирована концепция системы поддержки летчика, в основе которой лежит индивидуально-адаптированная модель его управляющих действий, были предложены методы и алгоритмы формирования таких моделей. В настоящей статье рассмотрены возможности использования нейросетевого подхода, и в частности индивидуально-адаптированных нейросетевых моделей летчика для решения задач оперативного контроля и послеполетного анализа его управляющих действий с целью согласования технического и биологического сегментов системы «самолет-летчик». Сохраняя преемственности изложения, кратко повторим основные идеи предложенного ранее подхода.

Под моделью действий летчика понимается зависимость  $\mu(Z, l)$ , которая для каждого значения дальности  $l$  до некоторой заранее известной точки траектории и соответствующего этой дальности состояния  $Z$  системы «самолет-летчик» определяет прогнозируемую точность приведения самолета в некоторую терминальную точку, характеризующуюся некоторой скалярной величиной  $\mu$ . Модель  $\mu(Z, l)$  представляется в виде нейронной сети типа многослойный персептрон с одним скрытым слоем. Индивидуальные особенности управляющих

реакция летчика проявляются в структуре и параметрах сети, определяемых по результатам процедуры «обучения» с использованием данных, накопленных в предыдущих полетах. В качестве таких параметров выделяются:

- набор входных данных нейронной сети (компонент вектора  $Z$ );
- количество нейронов скрытого слоя;
- весовые коэффициенты межнейронных связей между нейронами входного и скрытого слоя, а также между нейронами скрытого и выходного слоя.

Параметры нейросетевых моделей периодически уточняются по мере поступления новых данных в результате выполнения летчиками новых полетов, с учетом накопленного опыта и изменения летной квалификации. В дальнейшем в качестве типового полетного режима будем рассматривать режим посадки. Этот режим является наиболее строго регламентированным, что позволяет предположить, что если индивидуальные особенности управления самолетом проявляются на нем, то на других режимах полета эти проявления будут еще более существенным. На данном этапе исследований для каждого летчика будем применять следующие параметры, характеризующие точность приведения самолета в терминальную точку траектории при выполнении посадки:

- относительное отклонение по высоте от заданного значения в момент прохождения среза взлетно-посадочной полосы (ВПП):

$$\mu_h = \frac{\delta h}{\Delta_h}, \quad (1)$$

- относительное боковое отклонение в момент прохождения среза ВПП:

$$\mu_z = \frac{\delta z}{\Delta_z}, \quad (2)$$

где  $\delta h = h - h_3$ ,  $\delta z = z - z_3$  величины отклонений относительно заданных значений  $h_3, z_3$  в момент прохождения среза ВПП;

$\Delta_h, \Delta_z$  - предельно-допустимые отклонения этих параметров

## **1. Контроль и поддержка управляющих действий летчиков на основе индивидуально-адаптированных нейросетевых моделей**

Наличие индивидуально-адаптированных нейросетевых моделей летчиков в виде зависимостей  $\mu_h(\mathbf{Z}, l), \mu_z(\mathbf{Z}, l)$  позволяет реализовать контроль, а при необходимости поддержку управляющих действий летчика. На рисунке 1 приведена укрупненная блок-схема алгоритма контроля и поддержки управляющих действий летчика при выполнении посадочного режима на основе его индивидуально-адаптированной нейросетевой модели.

Выбор структуры приведенного на рисунке алгоритма обусловлен тем, что его использование ни в коем случае не должно приводить к увеличению нагрузки на пилота. Это требование является принципиальным ограничением, влияющим на способ практической реализации функции поддержки. Иными словами, формирование рекомендаций, направленных на поддержку управляющих действий летчика, должно производиться только тогда, когда возникает реальная опасность возникновения нештатной ситуации.

В рамках приведенной на рис. 1 схемы момент активизации алгоритмов поддержки управляющих действий оператора определяется условиями:

$$|\mu'_h(\mathbf{Z}, l)| > 1, \text{ что свидетельствует об опасности возникновения недопустимой}$$

ошибки приведения самолета на срез ВПП по высоте, или

$$|\mu'_z(Z, l)| > 1.$$

Последнее неравенство имеет место, если текущие действия оператора не обеспечивают заданных требований по боковому отклонению на срезе ВПП.

В этих случаях возникает необходимость поддержки управляющих действий оператора для исключения опасности аварийной посадки. Проблема выбора конкретного способа реализации рекомендаций, направленных на поддержку действий летчика, является сложной комплексной задачей, возникающей в процессе проектирования любой человеко-машинной системы и затрагивающей такие области как медицина, психология, эргономика.

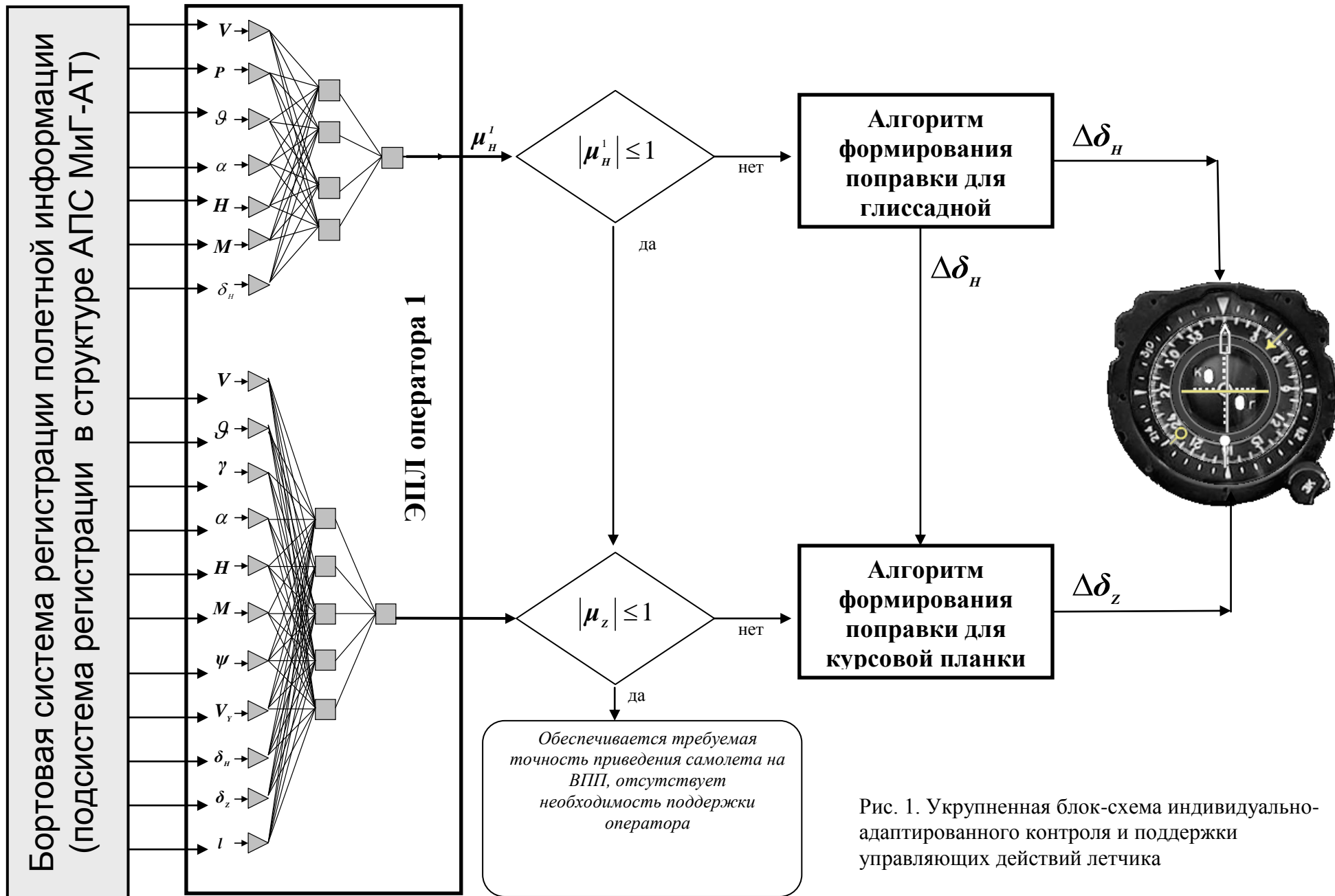


Рис. 1. Укрупненная блок-схема индивидуально-адаптированного контроля и поддержки управляющих действий летчика

Изучение поведения летчика в особых ситуациях полета в реальных полетах и на тренажере, выполненное специалистами ГНИИИ военной медицины МО РФ, позволило установить, что надежность его действий определяется двумя характеристиками сигнальной информации – ее привлекающим эффектом, от которого зависят вероятность и время обнаружения сигналов, и их содержания, влияющего на надежность опознания текущей полетной ситуации и принятие решения [8]. Для эффективности действий экипажа важно, чтобы сам сигнал, по возможности, минимально отвлекал от пилотирования, но способствовал при этом организации адекватных действий.

Поскольку для работы летчиков в директорном режиме управления, реализуемом на большинстве типовых пилотажных режимов, характерна повышенная концентрация внимания на командно-пилотажном индикаторе, которому уделяется до 70-80% времени, можно, сохраняя его штатную базовую компоновку, таким образом формировать индицируемые сигналы, чтобы реализовать принцип индивидуально-адаптированной помощи летчику. Наиболее просто эта стимулирующая коррекция реализуется посредством добавления поправок для курсовой и глиссадной планок. Рассмотрим конкретный механизм формирования этих поправок.

Значение показаний глиссадной планки формируется на основе текущего углового рассогласования по глиссаде  $\delta^{тек}$  (рис. 2). Полученное значение углового рассогласования масштабируется с использованием



характеристик конкретного курсо-глиссадного прибора и выдается летчику в виде глиссадной планки на приборе.

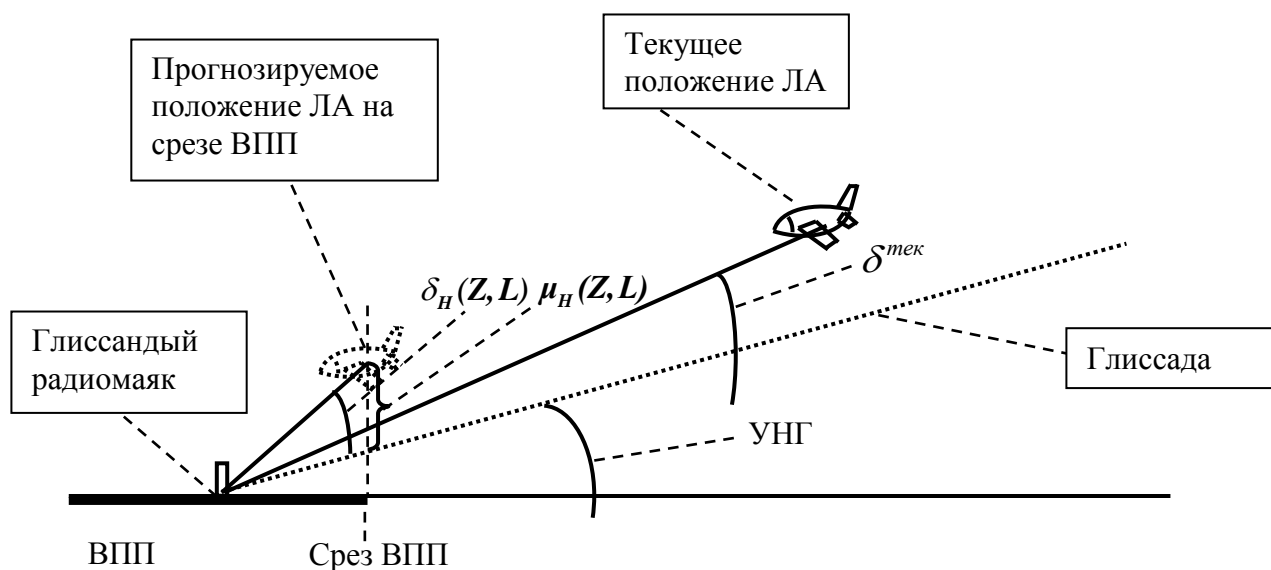


Рис.2. Схема формирования поправок к значению глиссадной планки

Величина поправки к значению глиссадной планки формируется исходя из такого же принципа. Принципиальное отличие заключается в том, что в качестве основы используется не текущее угловое рассогласование по глиссаде, а прогнозируемое рассогласование, вычисленное для терминальной точки траектории, соответствующей срезу ВПП (рис 2), вычисляемое на основании соотношения

$$\delta_H(Z, L) = \arctan\left(\frac{\mu_H}{L}\right)$$

(3)

Анализ нейросетевых моделей  $\mu_H(Z, l)$ ,  $\mu_Z(Z, l)$  показал, что влияние положения курсо-глиссадных планок на величину конечного

промаха тем слабее, чем больше удаление от ВПП. Учитывая данную особенность, формирования стимулирующих поправок для курсо-глиссадных планок предлагается формировать на основе величин.

$$\begin{aligned} \Delta\delta_H &= (1 - K(l)) \arctan\left(\frac{\mu_H}{L}\right) \\ \Delta\delta_Z &= (1 - K(l)) \arctan\left(\frac{\mu_Z}{L}\right) \end{aligned} \quad (4)$$

Зависимость  $K(l)$ , присутствующая в (4), приведена на рис. 3. Форма этой зависимости выбрана так, чтобы обеспечить плавное изменение положения курсовой и глиссадной планок, исключая их «биение».

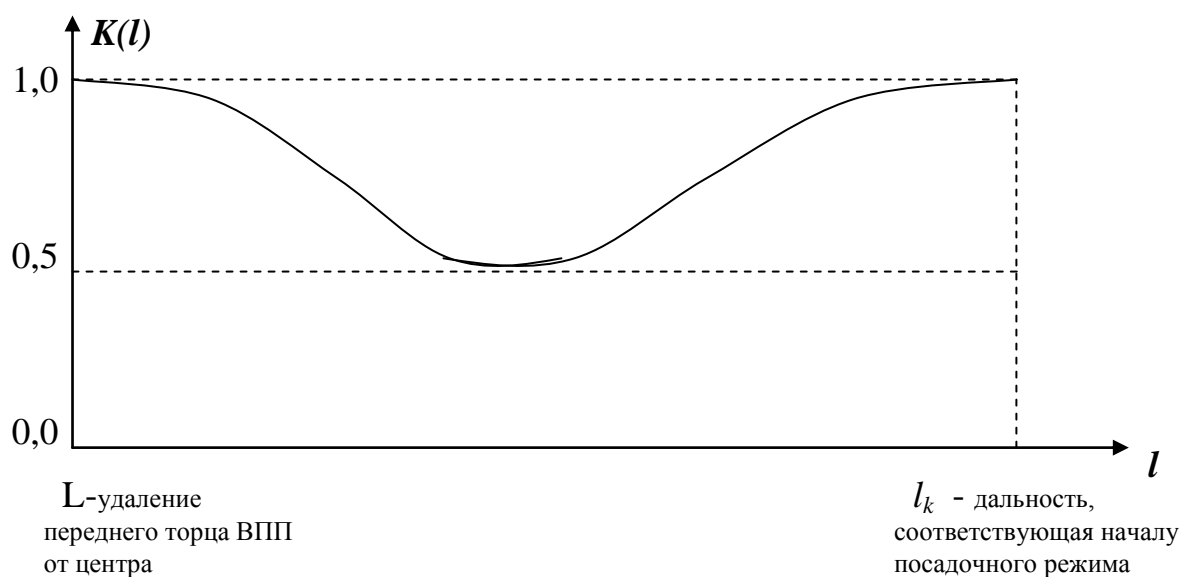


Рис. 3. Вид зависимости  $K(l)$ , используемой в алгоритме формирования стимулирующих поправок для курсо-глиссадных планок

## 2. Анализ управляющих действий летчика

Отмеченные выше свойства нейросетевых моделей позволяют рассматривать их в качестве эффективного инструмента анализа действий

летчиков, которые стали причинами авиационных происшествий. Проиллюстрируем подобную перспективу использования нейросетевых моделей на примере анализа действий летчика при выполнении посадочных режимов.

В качестве исходных данных используется информация о 50-ти выполненных посадочных режимах на аппаратно-программном симуляторе самолета МиГ-АТ. Вся совокупность посадочных режимов была разделена на две выборки. Первая объединяла данные по тем посадочным режимам, при реализации которых была обеспечена требуемая точность приведения самолета на срез ВПП по высоте, то есть выполнялось условие  $|\mu'_H(\mathbf{Z}, \mathbf{l})| \leq 1$ . Вторая выборка объединяла данные по неудачным посадочным режимам, характеризующимся недопустимым промахом по высоте приведения самолета на срез ВПП ( $|\mu'_H(\mathbf{Z}, \mathbf{l})| > 1$ ).

На основе этих выборок в соответствии с описанной выше методикой были построены нейросетевые модели оператора. На рис. 4 приведена нейросетевая модель, соответствующая удачно выполненным посадочным режимам, на рис. 5 – неудачным.

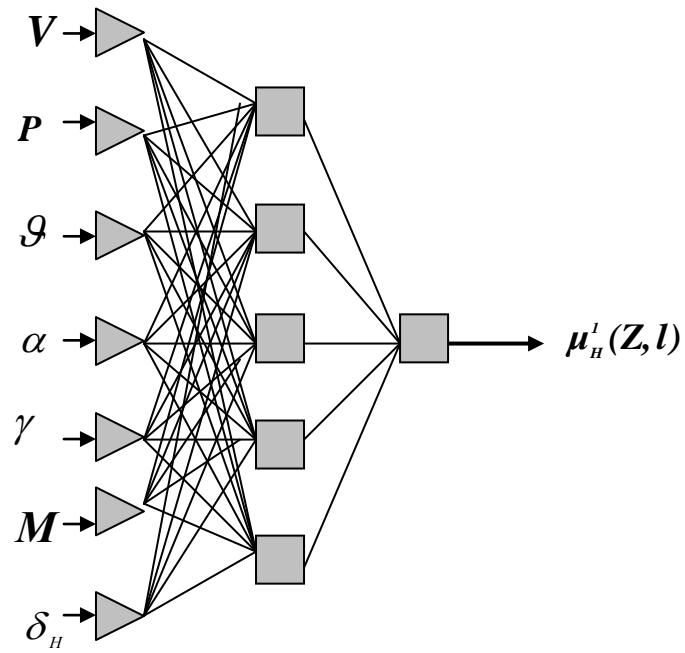


Рис. 4. нейросетевая модель летчика, соответствующая «удачным» посадочным режимам

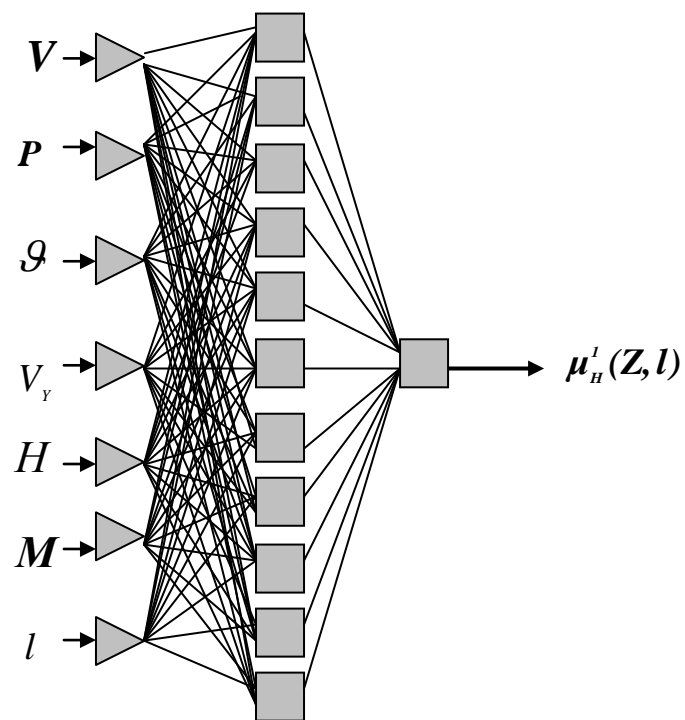


Рис. 5. нейросетевая модель летчика, соответствующая «неудачным» посадочным режимам

Анализ нейросетевых моделей, приведенных на рис. 4,5 позволяет сделать следующие выводы, относительно действий оператора при удачном и неудачном выполнении посадочных режимов:

- во всех случаях, объем анализируемых в процессе посадки пилотажных параметров одинаков, что естественно, поскольку он определяется ресурсами памяти и внимания оператора.

- различия между «удачными» и «неудачными» посадочными режимами вызваны различиями в составе анализируемых данных. В случае «удачных» посадочных режимов оператор строил управление на основе анализа значений скорости, тяги, углов тангажа, атаки, крена, числа Маха и положения глиссадной планки. Состав анализируемых параметров, соответствующих «неудачным» посадочным режимам включал: значения скорости, тяги, угла тангажа, высоты, вертикальной скорости, числа Маха и удаления от ВПП. Таким образом, можно предположить, что нештатное приведение оператором самолета на срез ВПП возникало тогда, когда он не уделял должного внимания значениям угла крена, положение самолета относительно глиссады вместо контроля положения глиссадной планки оценивал на основе совместного анализа значений текущей высоты и удаления от ВПП, а также не учитывал значений угла атаки, сосредоточив внимание на контроле значений скорости и ее вертикальной проекции.

### 3. Оценка эффективности поддержки управляющих действий операторов на основе индивидуально-адаптированных нейросетевых моделей.

Исходными данными для анализа были данные, накопленные в процессе выполнения оператором 5 серий по 50 посадочных режимов на аппаратно-программном симуляторе самолета МиГ-АТ. Для каждой серии полетов были сформированы нейросетевые модели  $\mu_Z(\mathbf{Z}, l^t)$ ,  $\mu_H(\mathbf{Z}, l^t)$ ,  $t = 1, \dots, 5$ , предполагающие активизацию системы индивидуально-адаптированной поддержки летчика на дальностях  $l^1 \leq 5400\text{м}, l^2 \leq 5000\text{м}, l^3 \leq 4000\text{м}, l^4 \leq 3000\text{м}, l^5 \leq 2000\text{м}$ .

Конкретный момент активизации алгоритмов поддержки управляющих действий оператора определяется условиями:  $|\mu_H(\mathbf{Z}, l^t)| > 1$ , что свидетельствует об опасности возникновения недопустимой ошибки приведения самолета на срез ВПП по высоте, или  $|\mu_Z(\mathbf{Z}, l^t)| > 1$ , что имеет место, если текущие действия оператора не обеспечивают заданных требований по боковому отклонению на срезе ВПП.

В этих случаях возникает необходимость поддержки управляющих действий оператора для исключения опасности аварийной посадки.

Эффективность индивидуально-адаптированных подсказок в виде стимулирующих поправок к положению курсо-глиссадных планок

количественно оценивалась путем соотнесения доверительных интервалов, обозначенных соответственно  $I_1, I_2, I_3, I_4, I_5$ , где

$I_t$  - доверительный интервал, характеризующий точность приведения самолета на срез ВПП по высоте при активизации системы индивидуально-адаптированной поддержки летчика на удалении  $l'$  от центра ВПП.

Использование для оценки эффективности индивидуально-адаптированной поддержки операторов доверительных интервалов, характеризующих точность управления по высоте, обусловлена существенно большей вариабельностью значений высоты на срезе ВПП по сравнению с вариабельностью значений бокового отклонения. В этом случае преимущества, достигаемые в результате реализации индивидуально-адаптированной поддержки операторов, проявляются наиболее наглядно.

На рис.6 приводятся доверительные интервалы  $I_0, I_1, I_2, I_3, I_4, I_5$ , характеризующие точность приведения самолета на срез ВПП по высоте оператором без какой-либо поддержки и с использованием нейросетевых моделей, соответствующих различным моментам активизации системы.

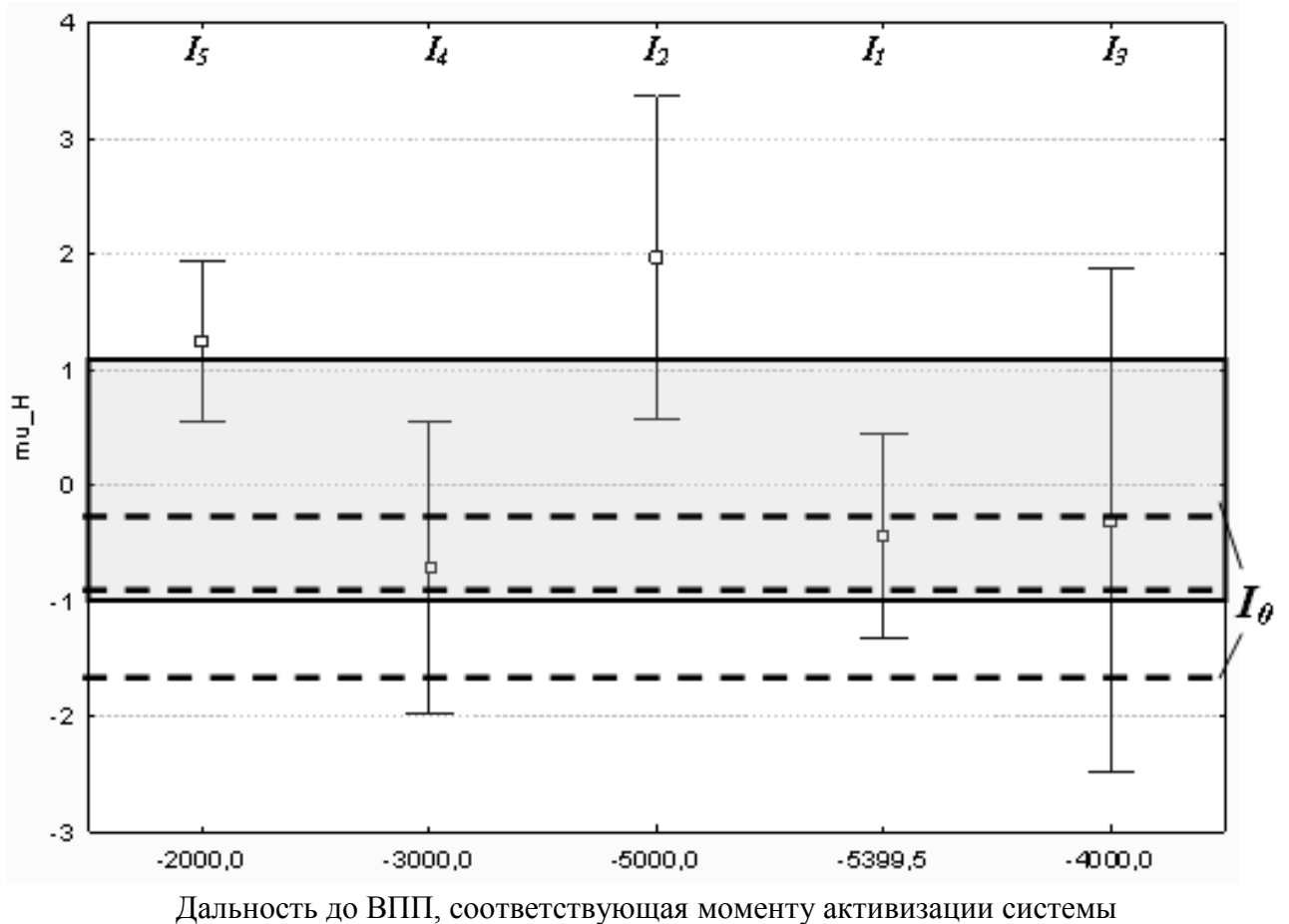


Рис. 6. Сопоставление точностей приведения самолета на срез ВПП по высоте без какой-либо поддержки оператора и с активизацией системы поддержки оператора в различные моменты

На рис. 6 тенью выделена область, соответствующая приведению самолета на срез ВПП с выполнением заданных требований по высоте, жирные линии отображают границы доверительного интервала  $I_0$ , характеризующего точность, достигнутую без какого-либо участия со стороны системы поддержки летчика.



Анализ доверительных интервалов, приведенных на рис. 6 позволяет сделать следующие выводы:

1) наибольший эффект в смысле точности приведения самолета на срез ВПП достигается в том, случае, когда бортовой системы поддержки летчика активизируется сразу после выхода на посадочную глиссаду. В этом случае доля «неудачных» траекторий, выполненных с нарушением заданных требований по высоте приведения самолета на срез ВПП, снижается с 50% до 25%, то есть достигается почти двукратное повышение безопасности посадки;

2) более поздняя активизация системы поддержки летчика не приводит к повышению точности приведения самолета на срез ВПП по высоте. Это объясняется следующими причинами:

- малая продолжительность посадочного режима, снижающая эффективность помощи со стороны ФПП бортовой системы поддержки летчика при его позднем включении;

- поскольку в рамках предложенного подхода поддержка летчика реализуется путем формирования специальных индивидуально-адаптированных стимулирующих поправок, если система включается не сразу, управление на начальном участке осуществляется с использованием традиционных курсо-глиссадных планок, формируемых радиотехнической системой посадки. После активизации системы поддержки положение курсо-глиссадных планок корректируется путем добавления стимулирующих поправок, рассчитываемых с учетом прогнозируемого промаха. В этот

момент возможно скачкообразное изменение положения планок, что затрудняет их восприятие оператором и может приводить к неверным управляющим командам.

3) использование реализованного в системе поддержки летчика алгоритма формирования стимулирующих поправок к положению курсо-глиссадных планок приводит к уменьшению математического ожидания значений промаха и, как следствие, к двукратному снижению числа нештатных траекторий, сопровождавшихся недопустимыми ошибками приведения самолета на ВПП. При этом использование системы поддержки летчика не приводит к снижению значения дисперсии промаха. Анализ выполненных оператором посадочных режимов показал, что причиной этого является эффект «биения» курсо-глиссадных планок, сопровождающийся скачкообразными изменениями их положения вследствие добавления стимулирующих поправок. Эти «биения» не являются систематическими, они возникают лишь при определенных комбинациях текущих значений параметров состояния системы «самолет-летчик», сопровождающихся скачкообразными изменениями значений прогнозируемого промаха. Можно надеяться, что исключение подобных «биений» положения курсо-глиссадных планок позволит повысить эффективность системы поддержки летчика.

4) Определенный интерес также представляет случай, при котором активация системы поддержки осуществлялась на дальности  $l^5 \leq 2000 м$ . В этом случае прогноз величины ошибки приведения самолета в заданную

точку осуществляется наиболее точно. Также в этом случае, как видно из рис. 6, величина отклонения от заданного значения высоты на срезе ВПП обладает наименьшей дисперсией, однако, при этом имеет место систематическая ошибка, приводящая к тому, что летчик «в среднем» приводил самолет выше верхней границы допустимого диапазона. Анализ посадочных траекторий показал, что без активации системы поддержки летчик обычно приводит самолет немного ниже заданной точки. Такое проявления индивидуальной манеры пилотирования обуславливает формирование поправок к глиссадной планке прибора, которые стимулируют летчика на действия, которые приводили бы к увеличению высоты в точке среза ВПП. Однако, реализуя такие управляющие действия, летчик не успевает выровнять самолет так, чтобы выполнить ограничение по высоте на срезе ВПП. В этом случае можно предположить, что повышение эффективности системы поддержки возможно путем оптимизация зависимости (рис. 3), определяющей вес стимулирующей поправки в общей величине показаний курсо-глиссадного прибора.

*Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки в рамках выполнения базовой части государственного задания в 2014 году (НИР «Разработка индивидуально-адаптированной бортовой системы контроля управляющих действий летчика в типовых полетных режимах и мониторинга технического состояния самолета»).*

## Библиографический список

1. Себряков Г.Г., Желтов С.Ю., Огинский А.А. Машиностроение. Энциклопедия. Т.1-4. Автоматическое управление. Теория. - М.: Машиностроение, 2000. С. 604-641.
2. Себряков Г.Г. Моделирование деятельности человека-оператора в полуавтоматических системах управления динамическими объектами // Мехатроника, автоматизация, управление. 2010. № 4. С. 17-29.
3. Себряков Г.Г. Проблемы проектирования полуавтоматических систем наведения летательных аппаратов // Вестник компьютерных и информационных технологий. 2007. № 10. С. 2-8.
4. Базлев Д.А., Евдокименков В.Н., Ким Н.В., Красильщиков М.Н. Концепция построения бортовой информационно-экспертной системы поддержки действий летчика в особых ситуациях полета // Вестник компьютерных и информационных технологий. 2007. №1. С. 10-25.
5. Базлев Д.А., Евдокименков В.Н., Красильщиков М.Н. Построение характеристических множеств для индивидуально-адаптированной поддержки летчика при выполнении типовых полетных режимов // Известия РАН. Теория и системы управления. 2008. №4. С. 97-108.
6. Евдокименков В.Н., Ким Р.В., Красильщиков М.Н., Себряков Г.Г. Использование нейросетевой модели управляющих действий летчика в интересах его индивидуально-адаптированной поддержки // Известия РАН. Теория и системы управления. 2015. №4. С. 111-123.

7. Евдокименков В.Н., Ким Р.В., Векшина А.Б., Якименко В.А. Исследование индивидуальных особенностей управляющих действий лётчиков в процессе посадки на основе нейросетевых моделей // Вестник Московского авиационного института. 2015. № 3. С. 17-29.
8. Архипова О.В. Новое решение задачи индикационного обеспечения режима интеллектуальной поддержки летчика // Труды МАИ, 2012, №62: <http://www.mai.ru/science/trudy/published.php?ID=35521>