

**МЕТОДОЛОГИЯ, МЕТОДЫ И ПРОГРАММНО-АЛГОРИТМИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ
ОБРАБОТКИ И ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОГО АНАЛИЗА
БОЛЬШИХ МАССИВОВ ИНФОРМАЦИИ****РАЗРАБОТКА НЕЙРО-НЕЧЕТКИХ ПРОГНОЗИРУЮЩИХ МАТЕМАТИЧЕСКИХ
МОДЕЛЕЙ ДЛЯ ОЦЕНКИ ФАКТОРОВ УГРОЗ БЕЗОПАСНОСТИ ПОЛЕТОВ В
ГРАЖДАНСКОЙ АВИАЦИИ****Ахrameев В.И., Цветков Е.С., Снезская А.М., Лебедева А.А.***Летно-исследовательский институт им. М.М. Громова,**Жуковский, Россия*akhrameev_vi@mail.ru, evgtsvrb@yandex.ru,
snezskaia.am@phystech.edu, lebedeva.aa@phystech.edu**Пашенко А.Ф., Вислогузов А.Д.***Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, Москва, Россия*

paschenko_alex@mail.ru, visloguzovaleksandr2001@mail.ru

Аннотация. В данной работе представлены результаты разработки различных видов математических моделей киберфизических систем на основе нечеткой логики и нейро-сетевых технологий для анализа безопасности полетов, на конкретных примерах изучен вопрос о применимости предложенных моделей для анализа угроз, а также исследованы подходы к внедрению математических инструментов в системе управления безопасностью полетов.

Ключевые слова: безопасность полетов, нечеткая логика, нейронные сети.

Введение

Стандарты и рекомендуемая практика ИКАО являются основой международного регулирования деятельности гражданской авиации. В соответствии с Глобальным планом ИКАО по безопасности полетов каждое государство – член ИКАО должно было в 2023 году разработать Государственную программу по безопасности полетов и к 2028 году внедрить систему управления безопасностью полетов (СУБП).

В настоящее время является актуальной проблема разработки и создания общего стандарта СУБП и его внедрения в авиационных предприятиях. Современная идеология предотвращения авиационных происшествий и инцидентов предполагает создание в авиапредприятиях системы управления безопасностью полетов, которая с помощью математического аппарата могла бы:

- выявлять фактические и потенциальные угрозы безопасности полетов,
- оценивать эффективность принятия корректирующих мер, необходимых для уменьшения факторов риска/опасности,
- обеспечивать непрерывный мониторинг и регулярную оценку уровня безопасности полетов.

ИПУ им. В.А. Трапезникова РАН многие годы глубоко занимается вопросом математического моделирования сложных кибер-физических систем в различных отраслях. В [1] предлагается общий подход к решению задачи создания СУБП в авиационной отрасли, а также рассматриваются возможные методы создания СУБП и их актуальность. На основе методов, представленных в работе [1] были разработаны прототипы модулей, которые можно применить в современной СУБП. В данной работе будут представлены прототипы модулей нечеткой логики, а также прототип нейронной сети.

Актуальность темы обусловлена тем, что на данный момент новая Государственная программа по безопасности полетов в РФ так и не разработана, а при отсутствии общей методологии управления риском БП и недостатке методических материалов по разработке и внедрению математических методов анализа угроз наблюдается широкая и субъективная интерпретация ряда положений Руководства по управлению безопасностью полетов (РУБП).

1. Математические модели, основанные на нечеткой логике

В данном разделе будут приведены структура и примеры работы моделей нечеткой логики для определения уровня опасности летательного аппарата (ЛА).

В [2] приведена теория по нечеткой логике. Также наиболее полноценно описаны все этапы построения нечеткой модели:

- Реализация алгоритма нечеткого вывода заключений,
- Создание базы нечетких правил,
- Введение нечеткости (fuzzification),
- Агрегирование (aggregation) степени истинности предпосылок по каждому из нечетких правил,
- Активизация (activation) заключений нечетких правил,
- Аккумуляция каждой выходной переменной,
- Приведение к четкости (defuzzification),
- Параметрическая оптимизация конечной базы нечетких правил.

В разработанных модулях применяются большинство из перечисленных этапов. Исключениями стали последние два. При постановлении задачи иногда необходимо чтобы результатом работы алгоритма было определение некоторого множества, а не конкретного значения. В такой ситуации не применяется этап дефазификации. Отсутствие параметрической оптимизации конечной базы нечетких правил связано со сложностями выполнения этого этапа. Для реализации подобной операции необходимо дополнять нечеткую модель нейронной сетью, которая, обучаясь на собранных и промаркированных данных, будет изменять функции принадлежности и правила. На момент разработки отсутствовал доступ к подобным базам данных.

Среди представленных в [2] алгоритмов: Мамдани, Сугено и Тсукамото, был выбран первый при реализации всех модулей. Это обусловлено тем, что при использовании данного алгоритма выводом являются нечеткие множества, подходящие для конкретизации рекомендаций, которые будут выводиться в качестве результата работы разрабатываемой системы помощи анализа проблем в СУБП.

Данный алгоритм описывает несколько последовательно выполняющихся этапов (рис. 1). При этом каждый последующий этап получает на вход значения, полученные на предыдущем шаге.



Рис. 1. структура алгоритма Мамдани

При реализации алгоритма Мамдани были выбраны следующие параметры:

В качестве метода логической дизъюнкции используется метод минимального значения (min)

$$T(A \vee B) = \min\{T(A), T(B)\};$$

В качестве метода логической конъюнкции используется метод максимального значения (max)

$$T(A \wedge B) = \max\{T(A), T(B)\};$$

- Для реализации вывода заключения используется метод минимального значения (min)

$$\mu'(y) = \min\{C_i, \mu(y)\},$$

- Где C_i – степень истинности заключения правила R_i , а $\mu(y)$ – функция принадлежности термина, который является значением выходной переменной данного правила;
- В качестве метода агрегирования используется метод максимального значения (max)
- В качестве метода дефазификации задан метод центра тяжести для дискретного множества значений функции принадлежности (centroid)

$$y = \frac{\sum_{i=1}^n x_i * \mu(x_i)}{\sum_{i=1}^n \mu(x_i)}$$

Реализация вышеописанных этапов для модулей нечеткой логики была произведена в Fuzzy Logic Toolbox в среде разработки Matlab. Полноценное описание интерфейса и возможностей данного инструмента описаны в [2,3].

Будут представлены два модуля нечеткой логики: для оценки качества производства воздушных судов (ВС) на заводе-производителе и для оценки причин авиационных происшествий. Для демонстрации работы этих модулей была создана собственная база данных по авиационным происшествиям за 2016-2019 года на основе отчетов межгосударственного авиационного комитета (МАК), [5].

1.1. Разработка нечеткой модели для оценки качества производства ВС на заводе-изготовителе

Данный модуль оценивает три входных параметра: выпускается ли воздушное судно, год выпуска, количество падений за год. Выходными данными является лингвистическая переменная, означающая уровень БП на воздушных судах определенного завода-изготовителя.

Значения года выпуска разделяются на три нечетких множества, заданных функциями принадлежности, которые характеризуют уровень новизны воздушного судна.

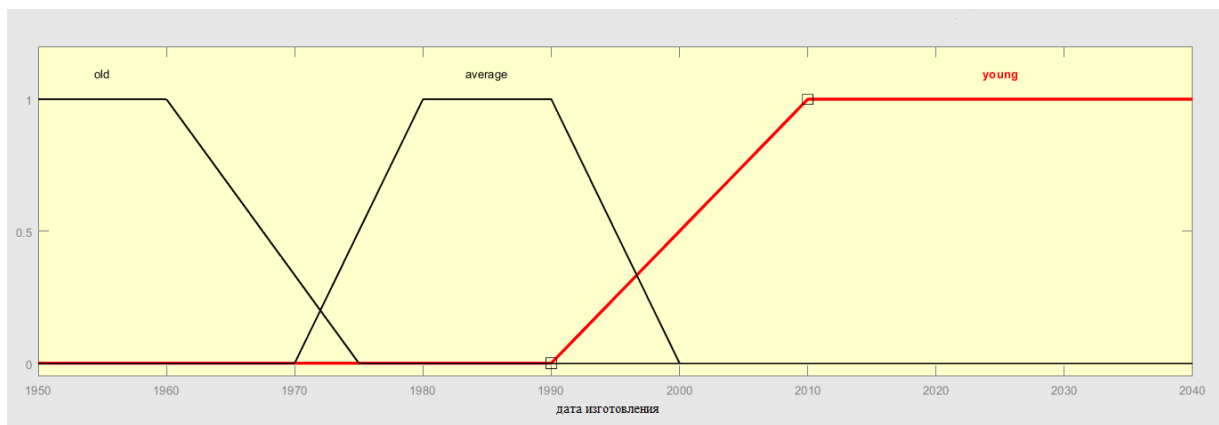


Рис. 2. Редактор функций принадлежности для определения нечетких множеств, задающих значения новизны воздушных судов

Параметр отвечающий за то, выпускается ли воздушное судно представлен в виде двух нечетких множеств: да, нет.

Значение количества падений за исследуемый интервал времени разделяется похожим образом на три нечетких множества: много, умеренно, мало. Эти нечеткие множества задаются функциями распределения.

Выходная переменная характеризует уровень общей безопасности летательных аппаратов рассматриваемого авиационного предприятия. Она представляется тремя нечеткими множествами, определяющими уровень опасности: низкий, средний и высокий.

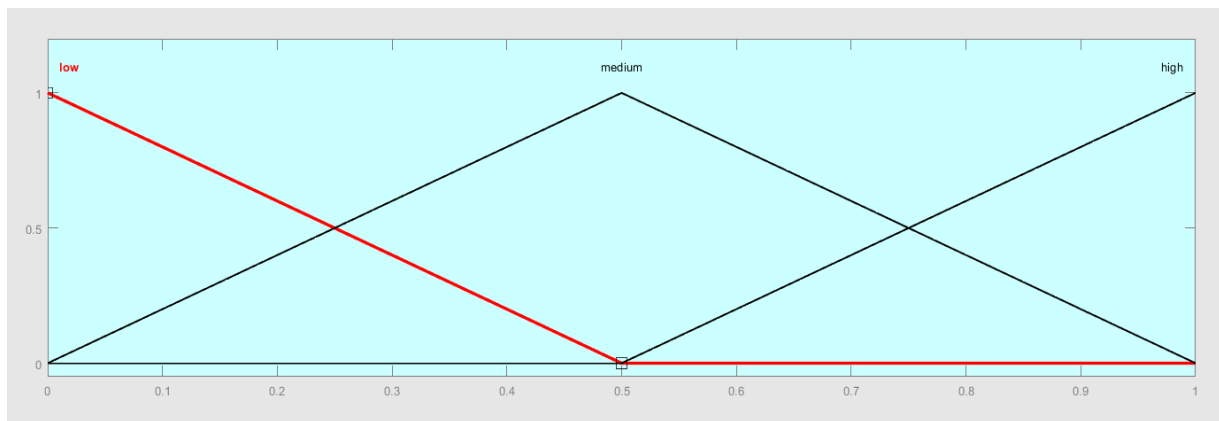


Рис. 3. Редактор функций принадлежности для определения нечетких множеств, задающих оценку безопасности ЛА

На основе экспертных знаний, собранных ранее, строится база правил. Эти правила устанавливают взаимосвязь между функциями принадлежности входных параметров с выходных. В данном модуле была составлена база из 18 правил.

1.2. Результаты работы нечеткой модели для оценки качества производства ВС на заводе-изготовителе

Рассмотрим работу описанного выше модуля на примере. Возьмем данные за 2016 год по компании «Robinson Helicopter Company» производящей вертолеты в США из составленной базы данных по АП.

Для работы модуля передадим следующие параметры: выпускается – 1, количество поломок – 13, год выпуска – 2013. Для просмотра результатов применяется графическая визуализация правил. На рис.4 каждый столбец среди первых трех отвечает за свой входной параметр. Четвертый столбец отвечает за выходное значение. Каждая строка является определенным правилом из базы правил.

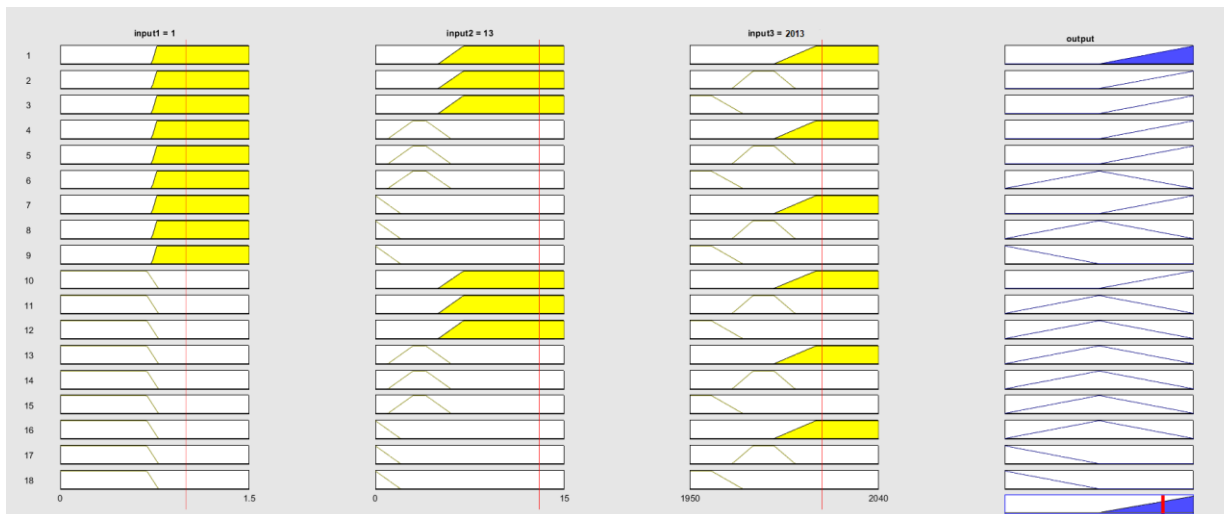


Рис. 4. Программа просмотра правил системы нечеткого вывода, входные значения (1,13,2013)

При передаче входных параметров происходит фазификация, в ходе которой активируются определенные функции принадлежности. Активирующиеся функции принадлежности подкрашиваются цветом. При выполнении правила активизируется функция принадлежности результата. В данном примере на выходе активизируется нечеткое множество, обозначающее высокий уровень опасности.

Подобным образом можно обрабатывать множество предприятий и их ЛА, составляя базу опасности предприятий.

1.3. Разработка нечеткой модели для оценки факторов авиационных происшествий

После определения опасных ЛА стоит определить факторы, которые приводят к авиационным происшествиям (АП) и которые стоит особо внимательно изучить, а также нейтрализовать.

Данный модуль оценивает три входных параметра: поломки, ошибки пилотов, сторонние причины. На выходе выдается лингвистическая переменная, определяющая область в которой заключается проблема и на что стоит обратить внимание при последующем более детальном и глубоком определении проблем.

Входные значения по поломкам, ошибкам пилотов и сторонним причинам разделены похожим образом на три нечетких множества, описываемых функциями принадлежности, обозначающих количество АП, связанных с фактором определенного типа.

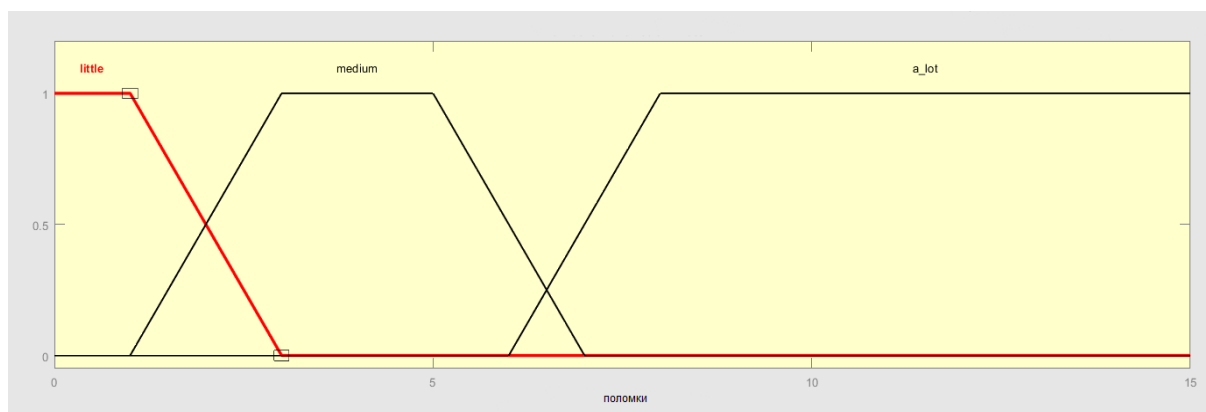


Рис. 5. Редактор функций принадлежности для определения нечетких множеств, задающих значения количества поломок

Выходная переменная разделена на четыре нечетких множества, представляющих собой: предприятие, завод, оба объекта и ни один из них. В зависимости от того, какое из 28 заданных правил будет активировано, будет выбран наиболее вероятный отдел, на который стоит обратить внимание и применить меры к улучшению работы этого объекта.

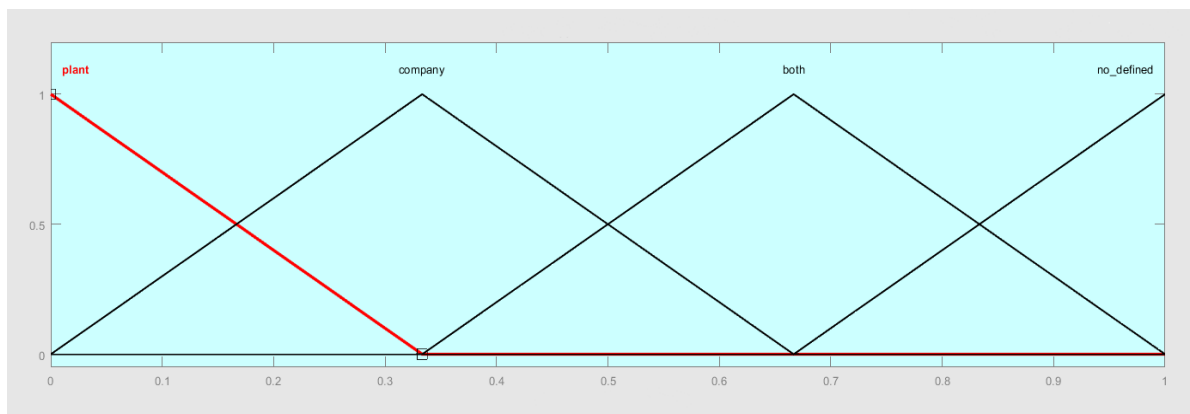


Рис. 6. Редактор функций принадлежности для определения нечетких множеств, задающих оценку факторов авиационных происшествий

1.4. Результаты работы нечеткой модели для оценки факторов авиационных происшествий

После применения первого модуля было выявлено, что компания Robinson Helicopter Company имеет большие проблемы с безопасностью полетов. Применим второй модуль для оценки факторов, влияющих на безопасность полетов.

Примем за входные параметры следующие значения: поломки – 1, ошибки пилотов – 12, внешние факторы – 4. Интерфейс и алгоритм работы схожи с предыдущим модулем.

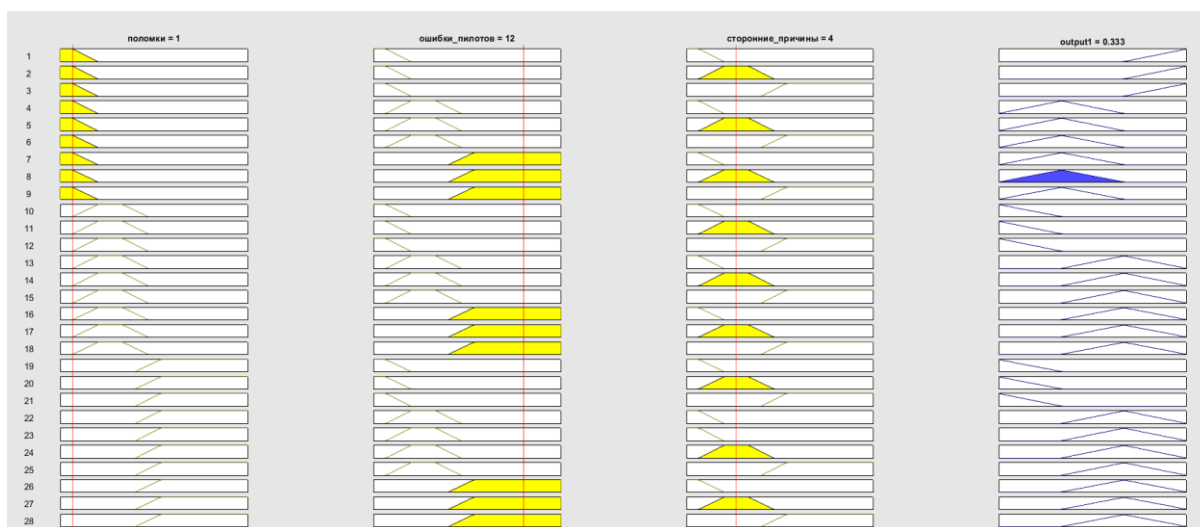


Рис. 7. Программа просмотра правил системы нечеткого вывода, входные значения (1,12, 4)

Выводом программного модуля является второе нечеткое множество, отвечающее за компании, содержащие самолеты и пилотов. На основе данных результатов можно сделать заключение, что существует большая проблема, заключающаяся в культуре пилотирования ЛА и необходимо применить меры по ее улучшению.

2. Применение нейросетевых технологий в системах управления безопасностью полетов

На сегодняшний день пилот является ключевым звеном в системе обеспечения безопасности полетов. Ввиду этого на него возлагается неимоверно высокая психофизиологическая нагрузка. Тем не менее, действия людей на данный момент контролируются только ими самими, нет наблюдения за

их психофизиологическим состоянием, и даже разбор катастроф происходит только с помощью расшифровки данных с “черного ящика” и бортовых данных о состоянии летательного аппарата.

В данной части работы предлагается метод определения состояния летчика по анализу звуковой дорожки, снимаемой системой записи для черного ящика. Идея работы со звуком обусловлена тем, что в ЛА всегда возникают трудности с добавлением новых систем, однако система записи звука есть в любом ЛА, что позволяет удобно и без особых проблем внедрить предлагаемую систему.

Общая теория, особенности и преимущества по применению нейронных сетей приведены в [7]. Также при разработке нейронной сети для анализа состояния пилотов во время полета была использована работа [8]. В ней описывается закон Йеркса-Додсона, согласно которому наибольшая эффективность деятельности человека достигается при среднем уровне мотивации, которая в свою очередь связана со стрессом.

2.1. Разработка нейронной сети для анализа состояния пилотов во время полета

В данной части работы будет описана непосредственно реализация системы распознавания психофизиологического состояния летчика, а именно, процесс звукового анализа и процесс создания и работы НС. Для непосредственного программирования задачи были использованы среда и язык Matlab, обладающий необходимым спектром возможностей.

На вход программы подается звуковой сигнал. Машина автоматически представляет его в виде осциллограммы, показывающей зависимость амплитуды от времени. Однако, как уже было отмечено, стресс по голосу можно определить в основном с помощью высоты голоса, которую мы можем узнать по частоте.

При импорте аудиофайла в программу она представляет его в виде графика амплитуды от времени. Данный способ представления не информативен для работы нейронной сети (НС), необходимо получить зависимость от частоты. Для этого используется преобразование Фурье (ПФ). на практике используется быстрое преобразование Фурье (FFT). После обработки данных с помощью FFT получается зависимость амплитуды от частот. Именно с этой информацией предстоит дальше работать НС.

Для решения задачи решено было изучать диапазон от 0 до 1200 Гц., разделенный на 24 одинаковых отрезков по 50 Гц. Правомерность этого решения можно обосновать тем, что любой звук не распределяется исключительно по одной частоте, а распределяются по некоторому отрезку, обычно превышающему 50 Гц.

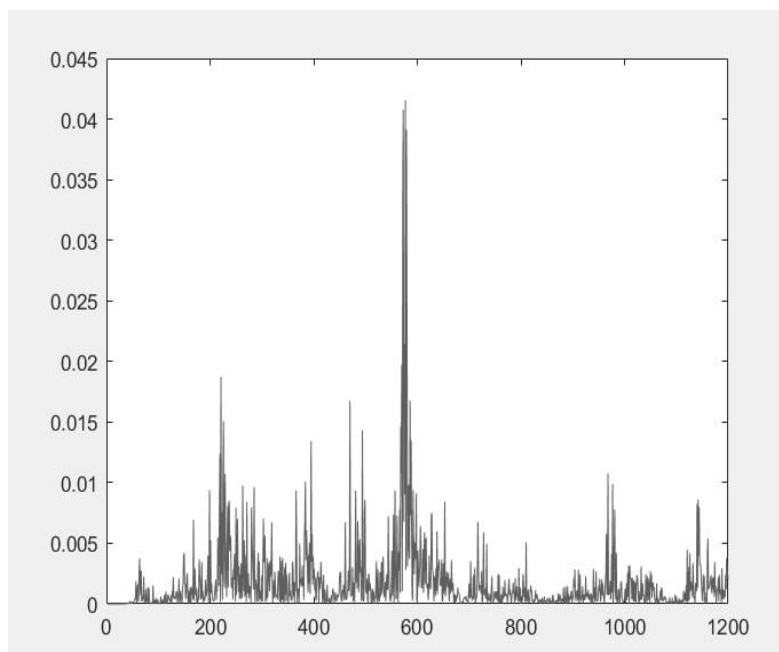


Рис. 8. Сигнал после ПФ

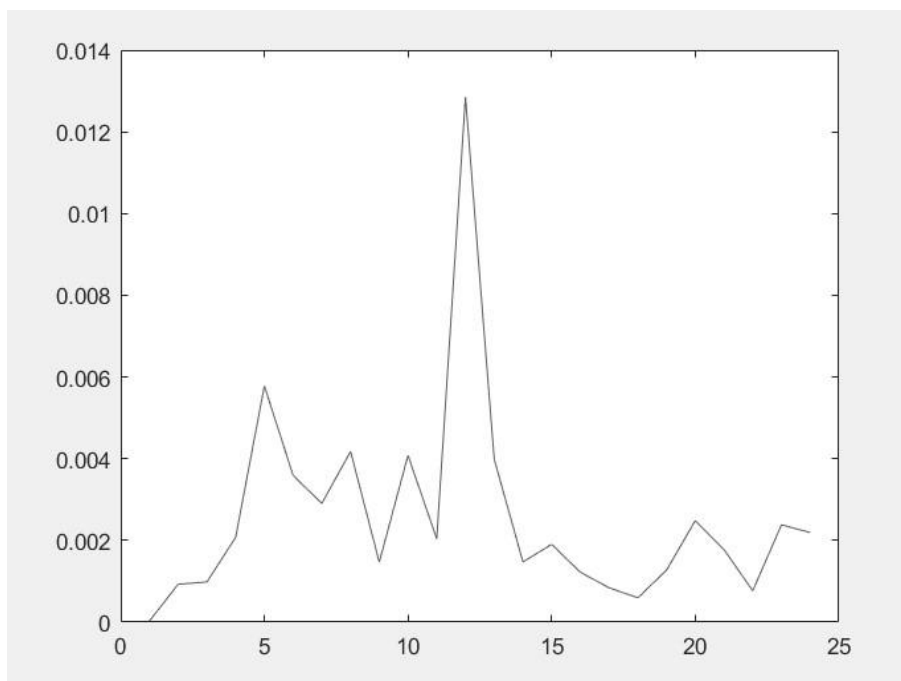


Рис. 9. Сигнал после аппроксимации

В рамках задачи данной работы используется многослойный персептрон (МП) с 24 входными нейронами, в каждом из которых - среднее значение амплитуды звукового сигнала на интервале в 50 Гц. Помимо входного слоя есть два скрытых полносвязных слоя с 15 и 5 нейронами соответственно, и выходной слой с одним нейроном. Выбран гиперболический тангенс в качестве функции активации на скрытых слоях, линейная для входного слоя и логический сигмоид для выходного. Подбор количества слоев, нейронов и функций активации производится эмпирическим путем. На выходе НС получается одно значение стресса, испытываемое в диапазоне в 2 секунды. Это значение лежит в пределах от 0 до 1, где:

- 0 - шум,
- 0.2 - низкий уровень стресса или его отсутствие,
- 0.5 - средний уровень стресса,
- 0.6-0.8 - высокий уровень стресса,
- 0.9 - 1 - недопустимый уровень стресса, паника.

Для представленной задачи была составлена обучающая выборка из 2000 образцов. В ней содержатся различные двухсекундные отрезки аудиозаписей, которые соответствуют различному уровню стресса. Необходимо заметить, что подборка была размечена вручную автором работы, что может повлиять на точность работы НС. Для подборки были использованы записи черных ящиков, взятые с авиационных катастроф и происшествий, аудиозаписи автомобильных аварий, а также штатные переговоры пилотов, речь человека в спокойном состоянии и различные шумы, такие как гул самолета, автодороги, шум ветра и тишина.

2.2. Результаты работы нейронной сети

По результатам работы удалось создать систему наблюдения психофизиологического состояния пилота на основе нейронных сетей. Рассмотрим ее работу на конкретном примере полета летчика-испытателя Романа Петровича Таскаева. При выполнении штопора на самолете МиГ-АТ произошел отказ СДУ. Пилот решает не катапультироваться и попробовать стабилизировать самолет и приземлиться. На графике ниже можно видеть изменения его уровня стресса при данном происшествии и распределение стресса, заданное вручную.

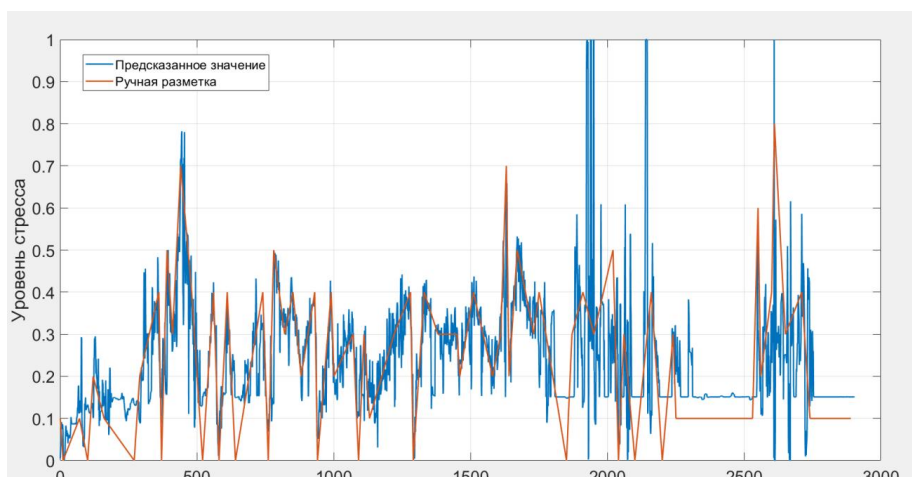


Рис. 10. Результат работы системы

3. Заключение

Были представлены возможные решения для создания СУБП на основе современных взглядов в отношении проблемы разработки подобных систем.

Разработаны конкретные программные модули, которые возможно применять для:

- анализа качества технического состояния воздушных судов и выявления опасных факторов, влияющих на безопасность полетов;
- анализа психофизиологического состояния экипажа с целью определения стрессовых ситуаций, требующих автоматизации вывода ВС из сложной ситуации.

Литература

1. Пащенко А.Ф., Хижинская Л.Д., Вислогузов А.Д., Ахrameев В.И. Вопросы построения моделей влияния факторов опасности и управляющих воздействий на безопасность полетов в гражданской авиации / Труды научно-практической конференции "Технологическое развитие авиационного: глобальные тенденции и национальные интересы России". – М.: НИЦ "Институт им. Н.Е. Жуковского", 2022.
2. Яхьяева Г.Э. Нечеткие множества и нейронные сети. – М.: Интернет Университет Информационных технологий; БИНОМ. Лаборатория знаний, 2006. – 316 с.
3. Кузнецов А.В., Макарьянц Г.М. Синтез нечеткого регулятора при помощи пакета прикладных программ системы Matlab: методическое пособие / А.В. Кузнецов, Г.М. Макарьянц. – Самара: СГАУ, 2016. – 59 с.
4. Тарасян В.С. «Пакет Fuzzy Logic Toolbox for Matlab»: учебное пособие / Екатеринбург: УрГУПС, 2013. – 112 с.
5. Межгосударственный авиационный комитет. Комиссия по расследованию авиационных происшествий) отчеты 2016-2019 годов [Электронный ресурс] – URL: <https://mak-iac.org/rassledovaniya> (проверено 1.06.2023).
6. Окончательный отчет по результатам расследования авиационного происшествия Ту-204-100В Внуково. Межгосударственный авиационный комитет. Комиссия по расследованию авиационных происшествий [Электронный ресурс] – URL: <https://www.baaa-acro.com/sites/default/files/import/uploads/2014/03/RA-64047.pdf> (проверено 9.07.2023).
7. Аксенов С.В., Новосельцев В.Б. Организация и использование нейронных сетей (методы и технологии) / С.В. Аксенов, В.Б. Новосельцев. – Томск: НТЛ, 2006. – 128 с.
8. Марищук В.Л. Поведение и саморегуляция человека в условиях стресса / В.Л. Марищук, В.И. Евдокимов В.И. Поведение и саморегуляция человека в условиях стресса – СПб.: Издательский дом «Сентябрь», 2001. – 260 с.