

**ИЗМЕРЕНИЕ ВРЕДНЫХ ВЫБРОСОВ И ТЕМПЕРАТУРЫ В
МАЛОЭМИССИОННОЙ КАМЕРЕ СГОРАНИЯ ГАЗОТУРБИННОГО
ДВИГАТЕЛЯ НА ОСНОВЕ НЕЙРО-НЕЧЕТКОЙ ТЕХНОЛОГИИ**

СОДЕРЖАНИЕ

1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧ ИССЛЕДОВАНИЯ.....	4
2. АНАЛИЗ И СИНТЕЗ УСТРОЙСТВ ВИРТУАЛЬНОГО АДАПТИВНОГО ИЗМЕРЕНИЯ КОНЦЕНТРАЦИИ ЭМИССИИ ОКИСЛОВ АЗОТА	6
2.1 Регрессионный метод одномерной оптимизации концентрации эмиссии окислов азота	6
2.2 Синтез виртуальных измерителей вредных веществ	11
2.2.1 Разработка структуры виртуального измерителя на базе персептрона	15
2.2.2 Разработка структуры виртуального измерителя на базе <i>RBF</i> -сети.....	18
2.2.3 Разработка структуры виртуальных измерителей на базе нечеткой логики	27
2.2.4 Разработка структуры виртуального измерителя температуры в камере сгорания на базе нечеткой логики.....	32
2.3 ВЫВОДЫ ПО ВТОРОЙ ГЛАВЕ	37
3. РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ЭМИССИЕЙ ОКИСЛОВ АЗОТА.....	38
3.1 Синтез динамической математической модели управления эмиссией оксидов азота на базе метода одномерной оптимизации.....	38
3.2 Выбор целевой функции и критерий оценки	43
3.3 Синтез моделей виртуальных измерителей на базе персептрона.....	44
3.3.1 Анализ функционирования моделей виртуальных измерителей на базе персептрона.....	47
3.3.2 Анализ адекватности построенных моделей на базе персептрона	54
3.4 Синтез моделей виртуальных измерителей на базе <i>RBF</i> -сети	55
3.4.1 Анализ функционирования моделей виртуальных измерителей на базе <i>RBF</i> -сети.....	58
3.4.2 Анализ адекватности построенных моделей на базе <i>RBF</i> -сети	63

3.5 Синтез моделей виртуальных измерителей на базе нечеткой логики.....	64
3.5.1 Анализ функционирования моделей виртуальных измерителей на базе нечеткой логики	71
3.5.2 Анализ адекватности построенных моделей на базе нечеткого подхода	73
3.6 Сравнительный анализ результатов построения измерителей.....	73
3.7 Результаты моделирования динамической модели управления эмиссией оксидов азота на базе регрессионного метода одномерной оптимизации.....	77
3.7.1 Постановка плана эксперимента	77
3.7.2 Результаты моделирования САУ выбросами окислов азота без учета возмущающих воздействий	79
3.7.3 Результаты моделирования САУ выбросами окислов азота с учетом возмущающих воздействий	80
3.8 ВЫВОДЫ ПО ТРЕТЬЕЙ ГЛАВЕ	87
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	88

1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧ ИССЛЕДОВАНИЯ

Малоэмиссионной камерой сгорания (КС) принято считать такую камеру, продукты сгорания (ПС) на выходе из которой содержат минимальное количество токсичных веществ, определяемое требованиями международных организаций, ответственных за чистоту окружающей среды [3].

С целью контроля эмиссией (выбросами) в 1986 г. комитетом по защите окружающей среды от воздействия авиации, Международной организации гражданской авиации (ICAO) были введены первые нормы на эмиссию. Обеспечение перспективных норм для выхлопных газов за стандартный взлетно–посадочный цикл возможно только при условии использования новых малоэмиссионных технологий сжигания топлива [4].

На основании существующих подходов к снижению эмиссии окислов азота в КС авиационного двигателя, в условиях нестационарности параметров объекта и влияния внешних климатических факторов перспективным и целесообразным представляются следующие направления исследования для обеспечения современных экологических требований:

а) Наиболее важной задачей при решении вопроса снижения окислов азота является разработка алгоритмов измерения температуры, расхода воздуха и окислов азота КС, с применением нейронных моделей на базе персептрона, *RBF*-сети и нечеткой логики.

Решение данной задачи является актуальным, поскольку выбор алгоритма напрямую зависит от производительности РЭД двигателя. Основными требованиями к алгоритмам следует отнести малое потребление вычислительных мощностей, применимость в простом программном обеспечении и обеспечение высокого быстродействия.

Согласно руководству по качеству воздуха в аэропортах [ИКАО, 2021 ISBN 978-92-9265-300-2] ИКАО признает, что аэропортовые источники эмиссии способны выбрасывать загрязняющие вещества, воздействие которых может привести к ухудшению качества воздуха в близлежащих населенных пунктах.

б) Вторая задача заключается в разработке динамической математической модели процесса расчета эмиссии окислов азота, в которой используется нейро-нечеткая структура, отвечающая требованиям систем реального времени.

Динамическая математическая модель производит расчет интеграла эмиссии окислов азота (NO_x) на опережение. Прогноз, с учетом температуры, позволяет своевременно принять меры по предотвращению избыточного выброса окислов азота и осуществлять управление этим процессом, а также повышать эффективность работы ГТД.

в) Третья важная задача, требующая комплексного решения, это разработка регрессионного метода одномерной оптимизации эмиссии вредных веществ с целью улучшения технических характеристик виртуальных измерителей, в условиях изменения внешних-климатических параметров;

Главная трудность решения этой задачи ложиться на интеллектуальную САУ малоэмиссионной камеры сгорания (МЭКС). Это обусловлено узким диапазоном устойчивой работы МЭКС, существенно зависящим от внешних факторов, также существует возможность возникновения термоакустических автоколебаний в ней, наличия нелинейностей (например, отключающихся коллекторов, изменения внешних климатических условий) [40]. По сути, задача управления эмиссией сводится к заданию (минимизации) доли расхода топлива через диффузионный контур с учетом ограничений по устойчивости рабочего процесса горения при изменении внешних и внутренних факторов в широком диапазоне. Существующие методы управления концентрацией эмиссией окислов азота не дают адекватного решения этих проблем [40], поскольку не учитывают вышеописанные особенности.

Планируется исследовать возможность применения искусственного интеллекта (ИИ), основанного на математическом аппарате нейронных сетей с участием нечеткой логики, что характеризует новизну данной работы, для управления ГТД. Нейро-нечеткие сети для управления ГТД должны переобучаться в зависимости от неопределенности изменения параметров

внешних условий работы объекта управления, гарантированной устойчивости, реализуемости в бортовой авиационной аппаратуре и возможности работы в «жестком» реальном времени.

г) Провести экспериментальное моделирование разработанных систем, для подтверждения работоспособности разрабатываемых САР.

Таким образом, можно сформулировать постановку задачи исследования для обеспечения нормативного контроля над выбросами вредных веществ, решаемых в данной работе:

1. Разработка регрессионного метода одномерной оптимизации эмиссии вредных веществ с целью улучшения технических характеристик виртуальных измерителей;
2. Разработка моделей функционирования вычислительных систем измерения эмиссии окислов азота на основе нейро-нечеткой технологии;
3. Разработка алгоритмов виртуальных адаптивных измерителей эмиссии окислов азота с учетом измерения окислителя и температуры на базе нечетких, нейронных и нейро-нечетких моделей, включающих анализ и обработку экспериментальных данных с целью формирования репрезентативных выборок.

2. АНАЛИЗ И СИНТЕЗ УСТРОЙСТВ ВИРТУАЛЬНОГО АДАПТИВНОГО ИЗМЕРЕНИЯ КОНЦЕНТРАЦИИ ЭМИССИИ ОКИСЛОВ АЗОТА

2.1 Регрессионный метод одномерной оптимизации концентрации эмиссии окислов азота

Исходя из вышеизложенных предложений (см. гл. 1), разработана динамическая математическая модель на основе статической эксперт-модели управления интегралом эмиссии окислов азота, которая невозможна без детального изучения динамических свойств двигателей, определяемых протекающими в них газодинамическими и тепловыми процессами, а также механическими свойствами их подвижных частей. Также при проектировании

современных систем управления следует учитывать, что свойства двигателей существенно меняются при изменении внешних условий, например, при изменении давления и температуры в атмосфере [41].

Входными сигналами статической эксперт-модели, построенной по результатам моделирования камер сгорания двигателей ГТУ-16П и ГТУ25П являются (см. рис. 2.1) Gt_{dif} – расход топлива в диффузионном контуре, выраженный в процентах (%); α_{kc} – коэффициент избытка воздуха (ед.); $A_{\text{гф}1}$ – расход топлива в гомогенном факеле 1, выраженный в процентах (%); $A_{\text{гф}2}$ – расход топлива в гомогенном факеле 2, выраженный в процентах (%); T_k – температура камеры сгорания (K); G_t – суммарный расход топлива на режиме (кг/ч); последний сигнал, приходящий в идентификационную модель, является t – время работы камеры на режиме (МСА) (сек.);

Выходным параметром модели является интеграл эмиссии выбросов окислов азота NO_x (кг), рассчитываемый на режимах работы до 914 м. (3000 футов) согласно сертификационной таблице МСА.

Реализация и описание модели, представлено в работе Т.А. Кузнецовой, В. Г. Августиновича «Вопросы теории и практики разработки робастных систем управления авиационными двигателями на базе встроенных математических моделей» [42].

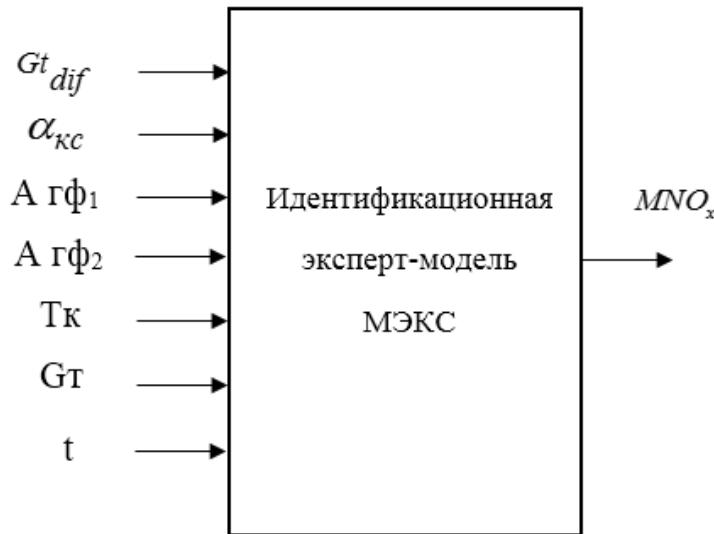


Рис. 2.1. Идентификационная статическая эксперт-модель малоэмиссионной камеры сгорания

Предложенная структура позволяет один раз в 6...10 сек. получать данные об интеграле эмиссии окислов азота, при заданных входных данных, что недопустимо в системе жесткого реального времени.

Учитывая статичность работы эксперта-модели эмиссии NO_x , накопление интеграла на каждом режиме происходит по линейному закону (см. рис. 2.2) при этом время на режимах полета может быть изменено.

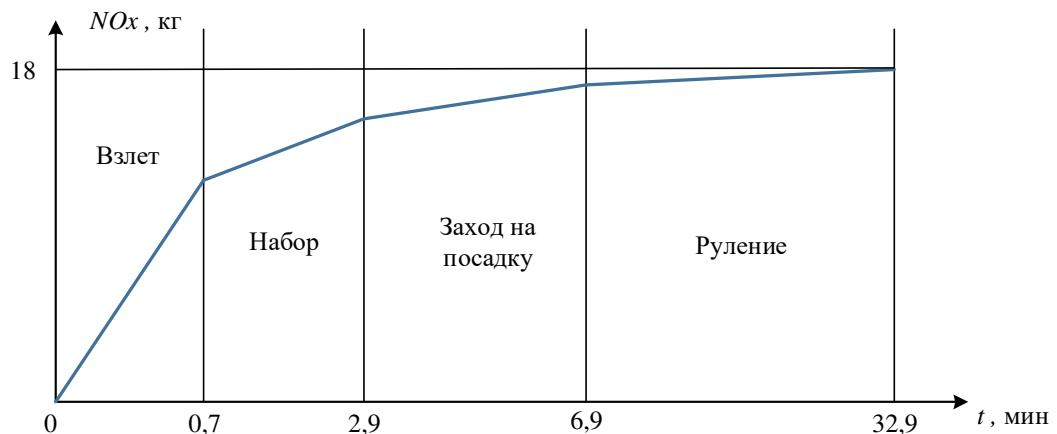


Рис. 2.2. Концепция накопления интеграла на основных полетных режимах

На начальном участке временного интервала был применен метод дихотомии для заранее неизвестной функции. Вид функции неизвестен,

известно, что она возрастающая (величина выбросов увеличивается, когда доля топлива в диффузионном коллекторе больше) и на нее накладываются ограничения.

Суть метода состоит в вычислении на каждой очередной итерации двух значений целевых функций в точках, отстоящих на величину α в обе стороны от середины интервала неопределенности D , т.е. множество ординат $\alpha_{\Gamma_1}, \alpha_{\Gamma_2}, \alpha_{\Gamma_k}$ [43].

Пусть требуется отыскать минимум NO_x на интервале $[a,b]$. Очевидно, что сначала интервал неопределенности D совпадает с отрезком $[a,b]$. Функция $NO_x(\alpha_\Gamma)$ непрерывна и возрастающая. Поскольку недопустимо в реальной системе полетных условий режимы: «бедного» срыва и виброгорения, то принято изменить начальные границы $[a,b]$ $a^* = a + a \cdot 0,1$, $b^* = b - b \cdot 0,1$ при условии $b^* > a^*$. В результате имеем новый интервал неопределенности D^* равный $[a^*, b^*]$. Далее на выбранном интервале рассчитываем $NO_x = \frac{a^* + b^*}{2}$.

Рекомендуется указанный ранее расчет применять на 15% от начального временного участка эксплуатационного режима двигателя, согласно стандартной ВПЦ для определения эмиссии. Дальнейший временной участок, 75% эксплуатационного режима, рекомендовано формировать следующим образом, так как $\alpha_\Gamma(\alpha_{KC}, G_{T_dif})$ функция нескольких переменных, то при достижении вышеуказанных границ интервала неопределенности изменяется перераспределение топлива через диффузионный коллектор:

- при «Полном бедном срыве*» уменьшается $G_{T_dif} \%$ (до 0,99 от фактического значения);
- при «Частичном бедном срыве*» увеличивается $G_{T_dif} \%$ (до 1,01 от фактического значения);
- при «Виброгорении*» увеличивается $G_{T_dif} \%$ (до 1,1 от фактического значения);

Если ни один из перечисленных режимов не активировался, то уменьшается значение $G_{T_dif} \%$ на величину малого приращения, например, 0 (режим с минимизацией интеграла выбросов окислов азота) или 1 (режим без минимизации).

При построении регулятора, обеспечивающего минимизацию выбросов окислов азота на среднестатистическом полете необходимо учитывать область устойчивого режима МЭКС, не допускающего режимы «бедного» срыва и виброгорения. Данные ограничения имеют вид:

$\alpha_T \geq 7$ – граница полного «бедного» срыва (100%);

$\alpha_T \geq 5$ – граница частичного «бедного» срыва (50%);

$\alpha_T \leq 3$ – граница виброгорения.

С учетом данных ограничений построена область управления (см. рис 2.3)

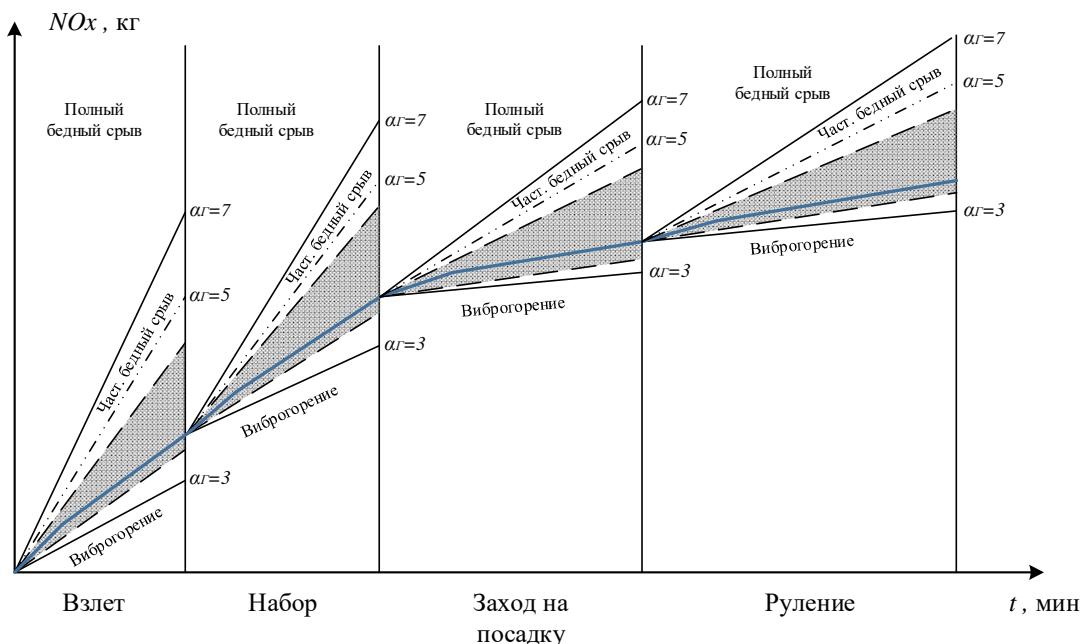


Рис. 2.3. Ограничения по управлению МЭКС и накопление эмиссии окислов азота за весь цикл полета,
где – зона регулирования, далее в названиях будет обозначаться «*».

Концепция регулирования заключается в том, чтобы не допустить выход текущего NO_x из заданных пределов. Это позволяет контролировать

концентрацию окислов азота и не допускать выход за пределы «частичного бедного срыва», «полного бедного срыва» или «виброгорения» (см. рис. 2.3).

В ряде определяющих факторов устойчивости горения и образования окислов азота нужно выделять следующие компоненты [44]:

- локальные температуры газа в МЭКС;
- время пребывания газа в зоне высоких температур;
- уровни концентрации кислорода и азота в зоне горения;
- температура воздуха на входе в КС.

Ниже представлены варианты реализации моделей построения виртуальных измерителей коэффициента избытка воздуха и окислов азота.

2.2 Синтез виртуальных измерителей вредных веществ

В настоящее время разработаны и в различной степени опробованы различные методы воздействия на процесс горения с целью снижения температуры и кислорода в зоне горения. Сюда, в первую очередь, следует отнести: работу с малым избытком воздуха, ввод газов рециркуляции, ступенчатый подвод окислителя, интенсивный теплоотвод из зоны горения путем установки радиационных и конвективных поверхностей, ввод пара или впрыскивание в зону горения [45;46].

Эти методы будут эффективны лишь в том случае, если они направлены на снижение температуры и концентрации кислорода в наиболее активных зонах горения. При оптимальной организации процесса можно получить снижение выбросов NO_x до 50%. Необходимо учитывать, что свойства двигателей существенно меняются при изменении внешних климатических условий, например, при изменении давления и температуры в атмосфере [47].

Постоянно растущие требования к системам автоматического управления (САУ), где отсутствует точное математическое описание объекта и процесса в целом при наличии неопределенностей, широко применяется нечеткое, нейронное и нейро-нечеткое управление [48; 49; 50].

Нейронные сети относят к методам, с помощью которых решается широкий класс задач [51]: классификация образов, оптимизация, прогноз данных, ассоциативное управление динамическими объектами и др. Причем, в силу всего вышесказанного, нейронные сети в сравнении с методами математической статистики справляются с перечисленными задачами тем успешнее, чем хуже формулируется задача, что обусловлено применением нейронных сетей для недетерминированных объектов.

Классическим примером нейронной сети является многослойный персепtron [52]. Основным преимуществом нейронного управления на базе персептрона является возможность выявления закономерностей в данных, их обобщение. Недостатком является невозможность непосредственно (в явном виде, а не в виде вектора весовых коэффициентов межнейронных связей) представить функциональную зависимость между входом и выходом исследуемого объекта [53]. Другими недостатками нейронного управления являются:

- большое число репрезентативных выборок;
- большое число циклов обучения (на несколько порядков больше синапсов искусственной нейронной сети (ИНС));
- забывания «старых» примеров;
- определения архитектуры (размеров и структуры) сети [54; 55].

Нечеткие регуляторы имеют возможность использования аналогии ассоциативного мышления человека и результатов развития экспертных систем, которые способны аккумулировать знания, полученные в различных областях деятельности [56]. На основе аккумулированных знаний формируется база знаний. База знаний включает в себя продукционные правила, связывающие лингвистические переменные. База знаний формируется на стадии проектирования нечеткого регулятора на основе знаний о свойствах объекта управления по следующей технологии: задается цель управления и при выделении существенных и отсечении второстепенных факторов определяется

начальное состояние системы, ее желаемое конечное состояние и правила действий, переводящих систему из начального состояния в желаемое конечное состояние. Нечеткие регуляторы позволяют работать с объектами управления с неполной информацией и обеспечивают получение качественных переходных процессов без использования громоздких вычислительных процедур, характерных для классических методов управления, например, с использованием принципа максимума. Особенностью нечетких регуляторов является возможность реализации нелинейной характеристики. При неполной информации об объекте система автоматического управления должна обладать адаптивными свойствами.

В настоящее время известны следующие методы адаптации систем нечеткого управления при отсутствии математического описания объекта управления:

- стохастический метод (метод Уидроу-Хоффа) [57];
- модифицированный метод наименьших квадратов [58];
- метод с последовательным обучением [59];
- специализированная *Anfis*-сеть и ее модификации [60];
- метод «пройденного пути» [61];

Подходы на основе нейронных сетей и нечеткой логики взаимно дополняют друг друга и лежат в основе принципа «мягких» вычислений [62].

Нечетко-нейронное (гибридное) управление реализуется нечетко-нейронными регуляторами (ННР) разных вариантов реализации. В основе нечеткого регулятора (НР) лежит жесткая архитектура, включающая блок фазификации, базу знаний, блок нечеткого вывода и блок дефазификации [62]. Рассмотрим достоинства и недостатки вариантов реализации НР.

1. Адаптивный НР, содержащий адаптивный фазификатор на базе сигмоидных функций принадлежности с применением метода последовательного обучения [62], базу знаний, нечеткую импликацию на базе нечетких нейронов типа «И» (без активационных функций), нечеткую

композицию для формирования результирующей функции принадлежности по Мамдани, либо Ларсену и дефазификатор с применением метода центроида [63].

Обучение в такой модификации НР отсутствует. Возможно применение в системе *MISO* (много входов – один выход). Недостатком является большой объем вычислительных операций для определения центра тяжести фигуры в блоке дефазификации, что снижает быстродействие работы регулятора.

2. Адаптивный НР, содержащий адаптивный фазификатор на базе сигмоидных функций принадлежности с применением метода последовательного обучения [59], базу знаний, нечеткую импликацию на базе нечетких нейронов типа «И» (без активационных функций) с последующей нормализацией, нечеткую композицию с применением уравнений Сугено и дефазификатор с применением метода средне взвешенного.

Обучение в ННР такой модификации также отсутствует. Недостатком является применение подхода только в системе *SISO* (один вход – один выход) [64].

3. Адаптивный НР, имеющий n -входных векторов, проекции которых, заданы терм-множеством обобщенных «колокообразных» функций принадлежности (ФП), которые размещены на нормированном интервале $-1 \dots +1$, содержащий базу знаний, нечеткую импликацию на базе нечетких нейронов типа «И» (без активационных функций) с последующей нормализацией, нечеткую композицию с применением полиномов Сугено и дефазификатор с применением метода среднего взвешенного (Сугено) [65].

Обучение в рассматриваемом ННР выполнено с «учителем», где в каждой эпохе параметры «колокообразных» ФП и полиномов Сугено настраиваются по методу наименьших квадратов (МНК) [65]. Применим в системе *MISO*. Недостаток – требуется большое число репрезентативных выборок для настройки параметров с дальнейшим запоминанием.

4. Адаптивный НР (*Anfis*-сеть – *Adaptive Network based Fuzzy Inference System*), имеющий n -входных векторов, проекции которых, заданы термомножеством обобщенных «колоколообразных» ФП, которые размещены на нормированном интервале $-1\dots+1$, содержащий базу знаний, нечеткую импликацию на базе нечетких нейронов типа «И» (без активационных функций) с последующей нормализацией, нечеткую композицию с применением полиномов первого порядка Сугено и дефазификатор с применением метода среднего взвешенного [66].

Обучение в этом НР гибридное и выполнено с «учителем», где в каждой эпохе параметры «колоколообразных» ФП и полиномов Сугено настраиваются в два этапа. На первом этапе настраиваются коэффициенты полиномов первого порядка Сугено по методу наименьших квадратов (МНК). На втором этапе остаточная невязка передается с выхода сети на входы при неизменных настройках коэффициентов полиномов Сугено настраиваются параметры «колоколообразных» ФП. Применим в системе *MISO*.

Недостаток – требуется большое число выборок для настройки параметров с дальнейшим запоминанием.

Ниже представлены варианты построения структуры виртуальных измерителей окислов азота и избытка воздуха в КС на базе интеллектуальных систем.

2.2.1 Разработка структуры виртуального измерителя на базе персептрона

Искусственные нейронные сети являются удобным и естественным базисом для предоставления информационных моделей, поэтому рассматривается проектирование на базе нейронной технологии адаптивного виртуального измерителя вредных веществ и распределение подачи топлива в камеру сгорания между диффузионным и гомогенным коллекторами с целью

снижения вредных веществ за взлетно-посадочный цикл летательного аппарата в районе аэропорта [67].

Снижение вредных веществ осуществляется за счет перераспределения топлива (керосина) по различным коллекторам с сохранением газодинамической устойчивости горения в камере. Это достигается равномерным распределением топливовоздушной смеси (ТВС) за счет поперечных пульсаций, оценка которого характеризуется коэффициентом камеры сгорания (коэффициентом камеры сгорания) α_{kc} по формуле (2.1) [68].

$$\alpha_{\text{kc}} = \frac{78 \frac{P_{\text{kc}}}{\sqrt{T_{\text{kc}} + k \frac{G_t}{P_{\text{kc}}}}}}{G_t \cdot 14,7}, \quad (2.1)$$

где G_t – расход топлива с выхода дифференциального коллектора; 14,7 – стехиометрический коэффициент, P_{kc} – давление в камере сгорания; T_{kc} – температура камеры сгорания.

У нормальной смеси с соответствующим количеством окислителя (кислорода) происходит полное сгорание углеводородного топлива (керосин) и образование окислов азота из воздуха и двуокиси углерода с водяным паром в диапазоне температур 1100...1600 °C. Если кислорода в ТВС мало, то при температуре ниже 1100 °C возможен срыв пламени (режим «бедного» горения), а при температуре выше 1600 °C возникает вибрационное горение с атомарным разложением NO_x . Протекание режимов «бедного» горения и вибрационного горения зависит от температуры ламинарного течения газов, состава ТВС, температуры и давления в камере сгорания (КС), геометрии КС и т.д. В совокупности указанные параметры характеризуют недетерминированный процесс горения в КС с фреймовым математическим описанием [69].

На рис. 2.4 приведена структурная схема виртуального адаптивного измерителя вредных веществ.

Нейронная часть измерителя состоит из двух персепtronов [70], где первый персептрон НС₁ измеряет текущее значение α_{kc} (2.1). Произведение G_t и α_{kc} дает

расчетное значение расхода окислителя (воздуха), который корректирует температуру газа с помощью адаптивного нечеткого регулятора (НР) в зависимости от программного изменения температуры F в зонах взлетно-посадочного цикла.

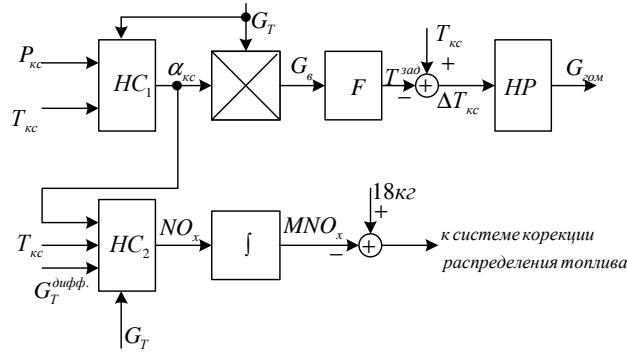


Рис. 2.4. Структурная схема виртуального адаптивного измерителя вредных веществ,

где НР – нечеткий регулятор, HC_1 , HC_2 – нейронные сети (персептроны)

Измерение температуры газа камеры сгорания $T_{\text{кс.тек.}}$ выполняется встроенным датчиком температуры (термопара с компенсацией инерционности) [71], далее будет представлен виртуальный датчик температуры. Второй персептрон HC_2 измеряет текущее значение NO_x , которое интегрируется с целью определения интеграла эмиссии окислов азота MNO_x . Если выбросов будет больше заданного значения, то необходимо выполнить настройку параметров персептронов виртуального измерителя. Адаптивность измерителя заложена в нечетком регуляторе НР, приведенного на рис. 2.5, где использован адаптивный фаззификатор [72; 73], а также в персептранах, обучаемых по методу Левенберга-Марквардта [74].

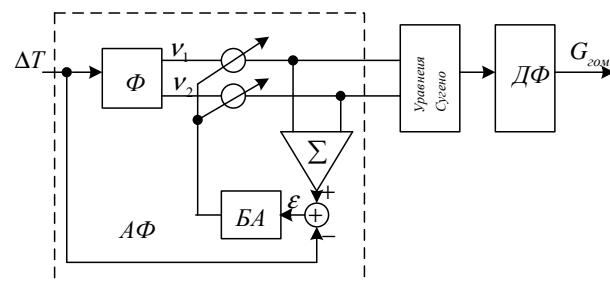


Рис. 2.5. Структурная схема адаптивного нечеткого регулятора

В дальнейшем будет приведена осциллограмма измерения $\alpha_{\text{кс}}$ в функции давления и температуры в камере сгорания и расхода топлива через диффузионный коллектор.

2.2.2 Разработка структуры виртуального измерителя на базе *RBF*-сети

Предлагается рассмотреть нейронное управление процессом горения в КС на базе *RBF*-сети [75]. Достоинством данной сети по сравнению с сетью прямого распространения на базе нейронов с логистическими активационными функциями является минимум расхода расчетных ресурсов, малый требуемый объем статической памяти с целью оптимального сокращения программного обеспечения регулятора электронного двигателя (РЭД) авиационного ГТД [76].

На рис. 2.6 приведена структурная схема управления процессом горения в камере ГТД с применением *RBF*-сети и адаптивного нечеткого регулятора (АНР).

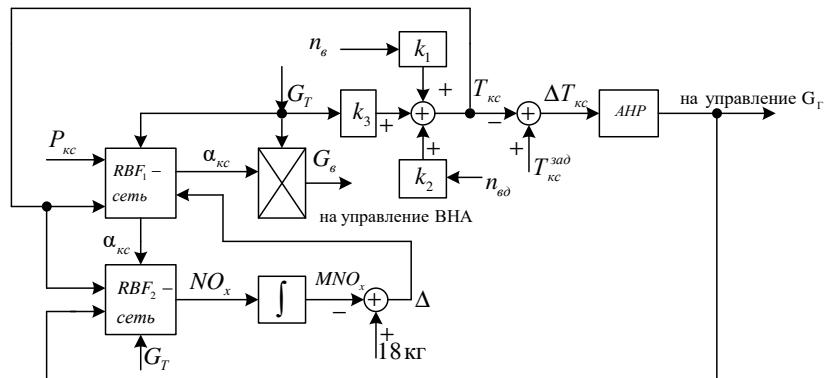


Рис. 2.6. Структурная схема управления процессом горения в камере ГТД с применением *RBF*-сети и АНР

Структурная схема управления процессом горения в камере ГТД с применением *RBF*-сети и адаптивного нечеткого регулятора (АНР) включает контур управления выносным управляющим аппаратом (ВНА), контур управления расходом топлива диффузионного коллектора, виртуальный интегрированный адаптивный измеритель вредных веществ (NO_x).

На рис. 2.7. приведена адаптивная RBF_1 -сеть измерения $\alpha_{\text{кc}}$, состоящая из радиально-базисных нейронов и линейного выходного нейрона.

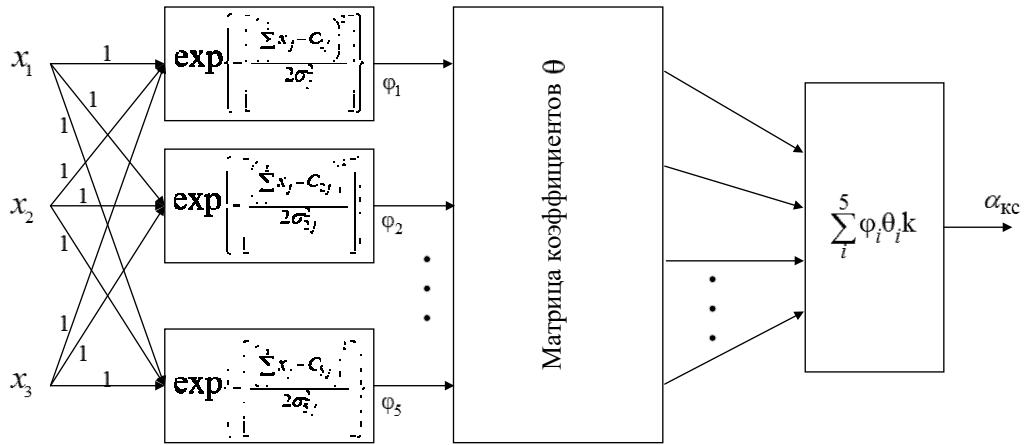


Рис. 2.7. Адаптивная RBF_1 -сеть для измерения $\alpha_{\text{кc}}$, имеющая три входа, где $x_1=f(G_{\text{T}})$, $x_2=f(T_{\text{кc}})$, $x_3=f(P_{\text{кc}})$ – входные функциональные зависимости измерителя избытка воздуха камеры сгорания

Рассмотрим графоаналитический способ проектирования архитектуры RBF_1 -сети для расчета $\alpha_{\text{кc}}$ [77].

Для проектирования архитектуры RBF_1 -сети расчета $\alpha_{\text{кc}}$ необходимы нормированные репрезентативные выборки, приведенные в табл. 2.1.

Таблица 2.1 – Исходные данные расчета $\alpha_{\text{кc}}$

Номер эксперимента	Входы			Выход
	G_{T}	$T_{\text{кc}}$	$P_{\text{кc}}$	
1	-0,6895	-1,6998	-0,9612	-1,5006
2	-0,6375	-0,0916	-0,6214	1,1331
3	-0,6375	-0,0916	-0,6214	1,1331
4	-0,6375	-0,0916	-0,6214	1,1331
5	2,0994	1,1749	1,9182	-0,5584
6	1,4893	1,0301	1,4626	-0,4034
7	-0,6441	0,4213	-0,0009	0,2797
8	-0,1582	0,4055	-0,0114	0,3028
9	-0,4258	-1,6998	-0,9612	-1,5006

Выполним превращения входных векторов в единичные вектора с тем же самым направлением в n -мерном пространстве по формулам (2.2):

$$\begin{aligned}\bar{x}_1 &= \frac{x_1}{\sqrt{x_1^2 + x_2^2 + x_3^2}}; \\ \bar{x}_2 &= \frac{x_2}{\sqrt{x_1^2 + x_2^2 + x_3^2}}; \\ \bar{x}_3 &= \frac{x_3}{\sqrt{x_1^2 + x_2^2 + x_3^2}}.\end{aligned}\quad (2.2)$$

В декартовой системе координат в относительных единицах согласно выбранным масштабам по оси абсцисс и оси ординат необходимо построить статическую характеристику значений входных параметров от номера эксперимента (см. рис. 2.7), на которой задаться центрами радиально–базисных нейронов [78], а затем циркулем построить окружности с разными радиусами дисперсий σ .

Таблица 2.2 – Данные построений

Номер эксперимента	2	4	6	8	9
Центры нейронов (Cx_j)	-0,4501	-0,4501	1,3273	0,0786	0,4340
Радиусы дисперсий (σ_i), ед.	1,9	1,5	2,2	2,3	1,9

В качестве функции активации нейронов примем функцию Гаусса [79, 80] и сформируем матрицу Грина G_I (2.3).

$$G_I = \begin{bmatrix} \varphi_1\left(\left\|\sum_i^3 x_i - C_{1j}\right\|\right) & \varphi_1\left(\left\|\sum_i^3 x_i - C_{2j}\right\|\right) & \dots & \varphi_1\left(\left\|\sum_i^3 x_i - C_{5j}\right\|\right) \\ \varphi_2\left(\left\|\sum_i^3 x_i - C_{1j}\right\|\right) & \varphi_2\left(\left\|\sum_i^3 x_i - C_{2j}\right\|\right) & \dots & \varphi_2\left(\left\|\sum_i^3 x_i - C_{5j}\right\|\right) \\ \dots & & & \\ \varphi_9\left(\left\|\sum_i^3 x_i - C_{1j}\right\|\right) & \varphi_9\left(\left\|\sum_i^3 x_i - C_{2j}\right\|\right) & \dots & \varphi_9\left(\left\|\sum_i^3 x_i - C_{5j}\right\|\right) \end{bmatrix} \quad (2.3)$$

Число столбцов прямоугольной матрицы Грина G_I равно выбранному числу нейронов скрытого слоя RBF_I -сети. Число строк матрицы Грина G_I равно числу выборок, неравное числу выбранных нейронов.

Запишем выходы скрытых нейронов (2.4) в соответствии с матрицей Грина G_I

$$\begin{aligned}
\varphi_1 &= \exp \left\{ - \left[\frac{\left(\sum_i^3 x_{li} - C_{1j} \right)^2}{2\sigma_{1j}^2} \right] \right\}; \\
\varphi_2 &= \exp \left\{ - \left[\frac{\left(\sum_i^3 x_{li} - C_{2j} \right)^2}{2\sigma_{2j}^2} \right] \right\}; \\
\varphi_3 &= \exp \left\{ - \left[\frac{\left(\sum_i^3 x_{li} - C_{3j} \right)^2}{2\sigma_{3j}^2} \right] \right\}; \\
\varphi_4 &= \exp \left\{ - \left[\frac{\left(\sum_i^3 x_{li} - C_{4j} \right)^2}{2\sigma_{4j}^2} \right] \right\}; \\
\varphi_5 &= \exp \left\{ - \left[\frac{\left(\sum_i^3 x_{li} - C_{5j} \right)^2}{2\sigma_{5j}^2} \right] \right\}.
\end{aligned} \tag{2.4}$$

Запишем выходы скрытых нейронов в соответствии с матрицей Грина G_I . Составим матрицу H_I (2.5).

$$H_I = \begin{pmatrix} \varphi_{11} & \varphi_{21} & \varphi_{31} & \varphi_{41} & \varphi_{51} \\ \varphi_{12} & \varphi_{22} & \varphi_{32} & \varphi_{42} & \varphi_{52} \\ \varphi_{13} & \varphi_{23} & \varphi_{33} & \varphi_{43} & \varphi_{53} \\ \varphi_{14} & \varphi_{24} & \varphi_{34} & \varphi_{44} & \varphi_{54} \\ \dots \\ \varphi_{19} & \varphi_{29} & \varphi_{39} & \varphi_{49} & \varphi_{59} \end{pmatrix} \tag{2.5}$$

Входы выборок необходимы для расчета выходов нейронов скрытого слоя RBF_I -сети.

Для определения матрицы коэффициентов \bar{w} выходного нейрона необходимо воспользоваться формулой (2.6) [81; 82]

$$\bar{w} = (H_1^T \cdot H_1)^{-1} H_1^T \cdot \bar{Y}_{kc} \quad (2.6)$$

где $\bar{Y}_{kc} = (\alpha_{kc1}, \alpha_{kc2}, \alpha_{kc3}, \alpha_{kc4}, \dots, \alpha_{kc9})^T$.

После определения матрицы весов \bar{w} для всех выборок их необходимо занести в память и в дальнейшем использовать для расчета α_{kc} для текущих входов RBF_1 -сети.

Далее определяется коэффициент α_{kc} по формуле (2.7) путем суммирования произведения выходов скрытых нейронов на взятый из памяти соответствующий элемент матрицы w_i

$$\alpha_{kc} = \sum_{i=1}^5 \varphi_i \cdot w_i \cdot k \quad (2.7)$$

Процесс обучения с учителем (без итераций) придает RBF_1 -сети адаптивность.

Аналогично проводится проектирование архитектуры адаптивной RBF_2 -сети для расчета текущих значений NO_x .

На рис. 2.8 приведена архитектура адаптивной RBF_2 -сети для измерения текущих значений NO_x при четырех входных параметрах:

$$x_1 = f(G_T), x_2 = f(T_{kc}), x_3 = f(G_r), x_4 = f(\alpha_{kc})$$

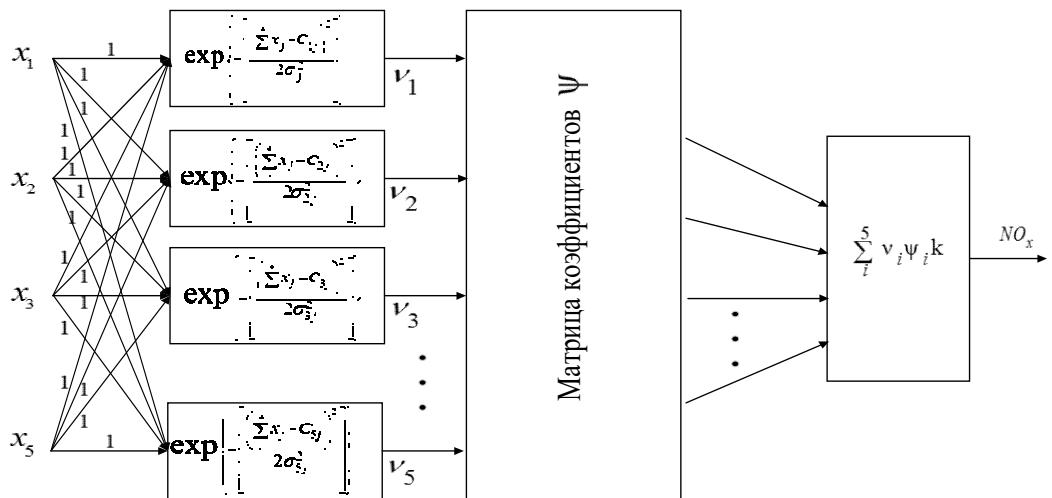


Рис. 2.8. Адаптивная RBF_2 -сеть для измерения параметра NO_x

Для проектирования архитектуры RBF_2 -сети необходимы выборки, приведенные в табл. 2.3.

Таблица 2.3 – Исходные данные расчета NO_x

Номер Эксперимента	Входы				Выход NO_x
	G_T	$\alpha_{\text{кс}}$	G_T	$T_{\text{кс}}$	
1	-1,5280	0,9487	0,4390	-0,0889	-0,7683
2	-0,9621	0,9487	-0,1560	-1,4216	-0,7195
3	-0,9621	0,9487	-0,6528	0,7997	-0,4336
4	-0,3962	0,9487	-1,1005	-0,5331	-0,5624
5	-0,3962	0,9487	0,7749	1,2439	0,3670
6	0,1698	0,9487	0,4390	-0,0889	-0,2001
7	0,7357	0,9487	-0,1560	-1,4216	-0,5628
8	0,7357	0,9487	-0,6528	0,7997	0,5786
9	1,3017	0,9487	-1,1005	-0,5331	-0,2484

Определим единичные вектора с тем же направлением входных векторов в n – пространстве согласно формул (2.8)

$$\begin{aligned}\bar{x}_1 &= \frac{x_1}{\sqrt{x_1^2 + x_2^2 + x_3^2 + x_4^2}}; \\ \bar{x}_2 &= \frac{x_2}{\sqrt{x_1^2 + x_2^2 + x_3^2 + x_4^2}}; \\ \bar{x}_3 &= \frac{x_3}{\sqrt{x_1^2 + x_2^2 + x_3^2 + x_4^2}}; \\ \bar{x}_4 &= \frac{x_4}{\sqrt{x_1^2 + x_2^2 + x_3^2 + x_4^2}}.\end{aligned}\quad (2.8)$$

В декартовой системе координат в относительных единицах согласно выбранным масштабам по оси абсцисс и оси ординат необходимо построить статические характеристики (см. рис. 2.9)

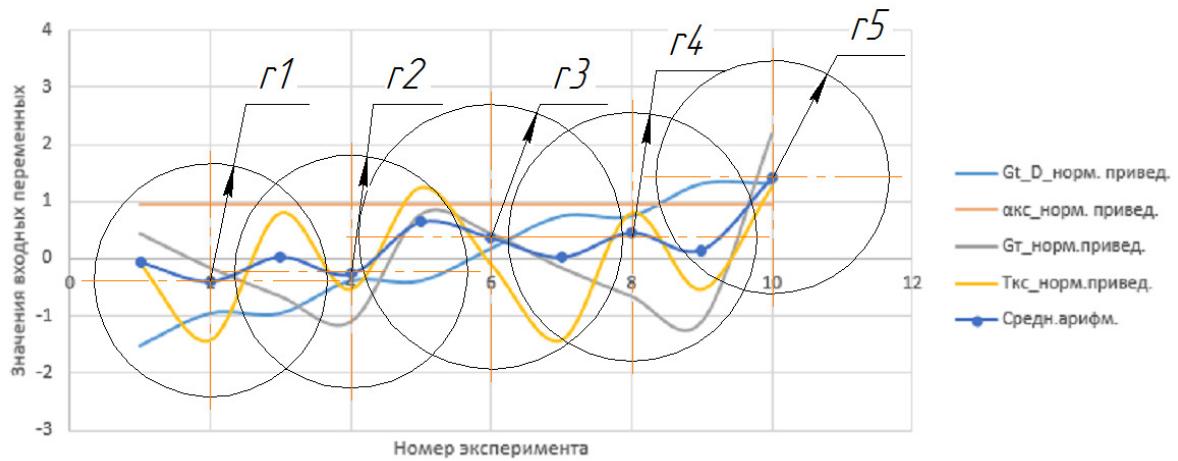


Рис. 2.9. Статические характеристики значений входных параметров от номера эксперимента

Выбрав одну из них (желательно среднюю) (см. рис. 2.9), необходимо задаться центрами радиально–базисных нейронов, а затем циркулем построить окружности с равными радиусами σ_{li} (дисперсии) с центрами выбранных точек, которые бы охватывали все статические характеристики и пересекались между собой.

В табл. 2.4 занесены данные построений.

Таблица 2.4 – Данные построений

Номер эксперимента	2	4	6	8	9
Центры нейронов (C_{lx_j})	-0,3978	-0,2703	0,3671	0,4578	1,4150
Центры нейронов (Y_{lj})	-0,7195	-0,5624	-0,2001	0,5786	2,5495
Радиусы дисперсий (σ_{li}), ед.	1,8	1,8	2,2	2,1	1,8

В качестве функции активации нейронов примем функцию Гаусса и сформируем матрицу Грина G_2 для сети RBF_2 (2.9):

$$G_2 = \begin{bmatrix} v_1\left(\left\|\sum_i^4 x_i - C_1\right\|\right) & v_1\left(\left\|\sum_i^4 x_i - C_2\right\|\right) & \dots & v_1\left(\left\|\sum_i^4 x_i - C_5\right\|\right) \\ v_2\left(\left\|\sum_i^4 x_i - C_1\right\|\right) & v_2\left(\left\|\sum_i^4 x_i - C_2\right\|\right) & \dots & v_2\left(\left\|\sum_i^4 x_i - C_5\right\|\right) \\ \dots \\ v_9\left(\left\|\sum_i^4 x_i - C_1\right\|\right) & v_9\left(\left\|\sum_i^4 x_i - C_2\right\|\right) & \dots & v_9\left(\left\|\sum_i^4 x_i - C_5\right\|\right) \end{bmatrix} \quad (2.9)$$

Число столбцов прямоугольной матрицы Грина G_2 равно выбранному числу нейронов скрытого слоя RBF_2 -сети. Число строк матрицы Грина G_2 равно числу выборок и неравное числу выбранных нейронов RBF_2 -сети.

Запишем выходы скрытых нейронов RBF_2 -сети в соответствии с матрицей Грина G_2 и выражений (2.10).

$$\begin{aligned} v_1 &= \exp\left\{-\left[\frac{\left(\sum_i^4 x_{li} - C_1\right)^2}{2\sigma_1^2}\right]\right\}; \\ v_2 &= \exp\left\{-\left[\frac{\left(\sum_i^4 x_{li} - C_2\right)^2}{2\sigma_2^2}\right]\right\}; \\ v_3 &= \exp\left\{-\left[\frac{\left(\sum_i^4 x_{li} - C_3\right)^2}{2\sigma_3^2}\right]\right\}; \\ v_4 &= \exp\left\{-\left[\frac{\left(\sum_i^4 x_{li} - C_4\right)^2}{2\sigma_4^2}\right]\right\}; \\ v_5 &= \exp\left\{-\left[\frac{\left(\sum_i^4 x_{li} - C_5\right)^2}{2\sigma_5^2}\right]\right\} \end{aligned} \quad (2.10)$$

Составим матрицу H_2 на базе матрицы Грина G_2 (2.11).

$$H_2 = \begin{pmatrix} v_{11} & v_{21} & v_{31} & v_{41} & v_{51} \\ v_{12} & v_{22} & v_{32} & v_{42} & v_{52} \\ v_{13} & v_{23} & v_{33} & v_{43} & v_{53} \\ v_{14} & v_{24} & v_{34} & v_{44} & v_{54} \\ \dots \\ v_{19} & v_{29} & v_{39} & v_{49} & v_{59} \end{pmatrix} \quad (2.11)$$

Входы выборок необходимы для расчета выходов нейронов скрытого слоя RBF_2 -сети.

Для определения матрицы коэффициентов $\bar{\psi}$ выходного нейрона необходимо использовать выходные данные исходной выборки и матрицу H_2 .

$$\bar{\psi} = (H_2^T \cdot H_2)^{-1} H_2^T \cdot \bar{Y}_{NO_x} \quad (2.12)$$

где $\bar{Y}_{NO} = (NO_{x1}, NO_{x2}, NO_{x3}, NO_{x4}, \dots, NO_{x9})^T$.

После определения матриц коэффициентов всех выборок их необходимо занести в память и в дальнейшем использовать для расчета NO_x в реальном времени для текущих входов адаптивной RBF_2 -сети.

Далее определяется коэффициент NO_x по формуле (2.13) путем суммирования произведения откорректированных выходов скрытых нейронов на соответствующий элемент матрицы ψ .

$$NO_x = \sum_{i=1}^5 v_i \cdot \psi_i \cdot k \quad (2.13)$$

Адаптация RBF_2 -сети достигается обучением с учителем (без итераций).

В вычислительной практике операция псевдоинверсии выполняется за один шаг и рассчитывается с применением декомпозиции *Singular Value Decomposition (SVD)* [84].

Расчет интеграла окислов азота проводится интегрированием текущих значений NO_x с контролем предельного значения NO_{x_max} (см. рис. 2.2). Разность текущего и заданного значений вредных веществ подается на вход RBF_1 -сети для коррекции подачи окислителя в КС через расчетное значение расхода

окислителя с помощью системы управления выносных направляющих аппаратов (ВНА).

Обучение RBF_1 -сети и RBF_2 -сети по сравнению с персепtronом с помощью алгоритма Левенберга–Марквардта требует на два порядка меньше числа выборок, на порядок быстрее обучается, исключает попадание в локальный минимум в процессе обучения и требует меньший объем статической памяти [85].

Расчет расхода гомогенного коллектора выполняется с помощью адаптивного нечеткого регулятора (АНР) с применением метода последовательного обучения.

Методы нечёткой логики нашли многочисленные применения в задачах управления, относящихся к разным областям человеческой деятельности: в промышленности, на транспорте и многих других [86, 87]. Понятия нечёткой логики и представления о нечётких множествах были впервые введены в работах Л.Заде [88]. В дальнейшем было разработано несколько вариантов реализации нечётких логических операций и основанных на них алгоритмов, а также способов получения информации с использованием нечётких систем

2.2.3 Разработка структуры виртуальных измерителей на базе нечеткой логики

На рис. 2.10 приведена структурная схема виртуального адаптивного измерителя вредных веществ на базе нечеткой логики.

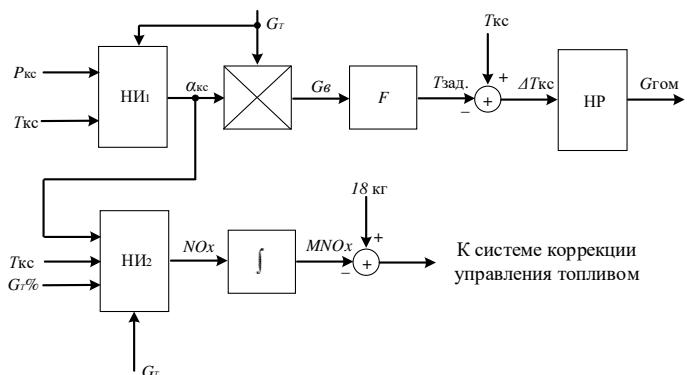


Рис.2.10. Структурная схема функционирования виртуальных измерителей

на базе нечеткого логики

Измеритель вредных веществ содержит три нечетких блока: первый адаптивный нечеткий измеритель избытка воздуха на входе в камеру сгорания НИ₁ рассчитывает текущее значение α_{kc} . Произведение G_T и α_{kc} дает расчетное значение расхода окислителя (воздуха), который корректирует температуру газов с помощью виртуального адаптивного нечеткого регулятора НР в зависимости от программного изменения температуры блоком F в зонах взлетно-посадочного цикла. Измерение температуры газа в камере сгорания T_{kc}^{tek} выполняется встроенным датчиком температуры (термопара с компенсацией инерционности), далее представлен виртуальный измеритель температуры. Второй нечеткий адаптивный блок является измерителем окислов азота НИ₂ показывает текущее значение NO_x , который интегрируется с целью определения суммарного значения интеграла NO_x с ограничением 18 кг. Если выбросов будет больше заданного значения необходимо выполнить настройку параметров виртуального измерителя. Адаптивность виртуального измерителя заложена в применении нечеткой логики с использованием адаптивного фазификатора [96].

Снижение вредных веществ в КС осуществляется за счет перераспределения топлива (керосина) по различным коллекторам с сохранением газодинамической устойчивости горения в камере. Это достигается равномерным распределением ТВС за счет поперечных пульсаций, оценка которого характеризуется коэффициентом камеры сгорания (коэффициентом избытка кислорода) α_{kc} (2.1) [96].

На рис. 2.11 приведена структурная схема адаптивного нечеткого измерителя избытка воздуха НИ₁.

На рис. 2.12 приведена структурная схема адаптивного нечеткого измерителя окислов азота НИ₂.

На рис. 2.13 приведена структурная схема адаптивного нечеткого регулятора НР.

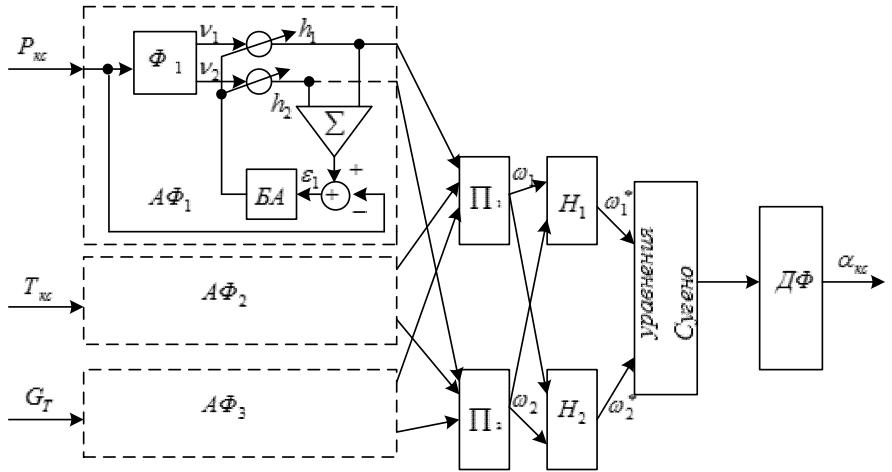


Рис.2.11. Структурная схема адаптивного нечеткого измерителя НИ₁

избытка воздуха $\alpha_{\text{кс}}$

Нечеткий измеритель избытка воздуха НИ₁ содержит три адаптивных фазификатора, два блока Π_1 , Π_2 , два нормализатора H_1 , H_2 , блок нечеткой композиции, реализующий уравнения Сугено и дефазификатор $\Delta\Phi$.

Блоки Π_1 , Π_2 (нечеткие нейроны) реализуют *max-min* операции над входами для вычисления минимальных значений выражений (2.14) и (2.15) [97; 98]:

$$\omega_1 = T(S(v_1 \cdot h_1)_1, S(v_1 \cdot h_1)_2, S(v_1 \cdot h_1)_3); \quad (2.14)$$

$$\omega_2 = T(S(v_2 \cdot h_2)_1, S(v_2 \cdot h_2)_2, S(v_2 \cdot h_2)_3). \quad (2.15)$$

Блоки H_1 , H_2 нормализуют выходы по формулам (2.16):

$$\omega_1^* = \frac{\omega_1}{\omega_1 + \omega_2}; \quad \omega_2^* = \frac{\omega_2}{\omega_1 + \omega_2}. \quad (2.16)$$

Нечеткий измеритель окислов азота НИ₂ содержит четыре адаптивных фазификатора, два блока Π_1 , Π_2 , два нормализатора H_1 , H_2 , блок нечеткой композиции, реализующий уравнения Сугено и дефазификатор $\Delta\Phi$.

Блоки произведений Π_1 , Π_2 (нечеткие нейроны) реализуют *max-min* операции над входами для вычисления минимальных значений выражений (2.17) и (2.18) [99]:

$$\omega_1 = T(S(v_1 \cdot h_1)_1, S(v_1 \cdot h_1)_2, S(v_1 \cdot h_1)_3, S(v_1 \cdot h_1)_4); \quad (2.17)$$

$$\omega_2 = T(S(v_2 \cdot h_2)_1, S(v_2 \cdot h_2)_2, S(v_2 \cdot h_2)_3, S(v_2 \cdot h_2)_4). \quad (2.18)$$

Блоки H_1, H_2 нормализуют выходы по формулам (2.16).

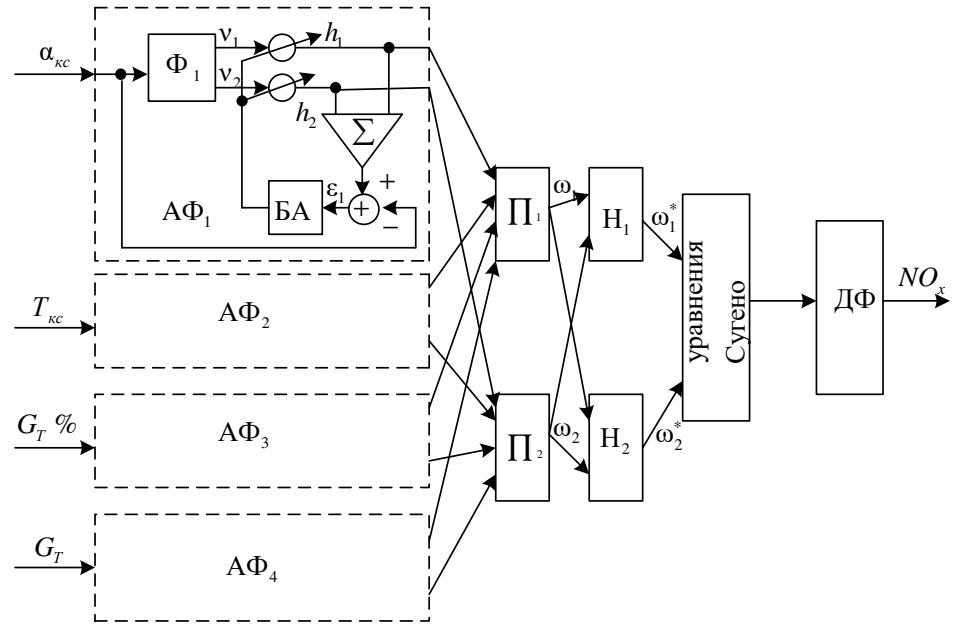


Рис.2.12. Структурная схема адаптивного нечеткого измерителя окислов азота
 $НИ_2$

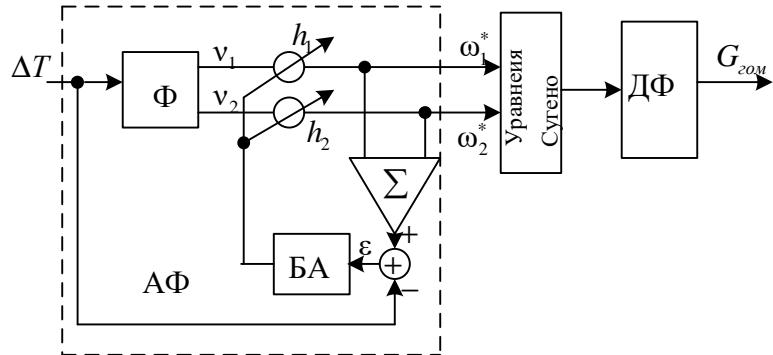


Рис.2.13. Структурная схема адаптивного нечеткого регулятора $НР$,
где Φ – фазификатор; $БА$ – блок адаптации; v_1, v_2 – степени активации выхода
фазификатора; h_1, h_2 – корректирующие коэффициенты; ε – вход $БА$
Адаптивный нечеткий регулятор $НР$ содержит адаптивный фазификатор
($A\Phi$), блок нечеткой композиции на базе уравнений Сугено и дефазификатор
($Д\Phi$). В качестве функций принадлежности выбираются асимметричные
сигмоидные функции [100; 101]:

$$L_i(x_i) = [1 + \exp(-b_i(x_i - C_i))]^{-1};$$

$$H_i(x_i) = [1 + \exp(-b_i(x_i - C_i))]^{-1}; \quad (2.19)$$

$$H_i(x_i) + L_i(x_i) = 1$$

где $L_i(x)$ и $H_i(x)$ – сигмоидные функции принадлежности; b_i – коэффициент наклона функций принадлежности задаваемых в интервале $[0...1]$; C_i – заданное значение лингвистических переменных; X_i – отклонение текущего параметра от заданного значения (синглтон).

На рис.2.14 приведены кривые сигмоидных функций принадлежности.

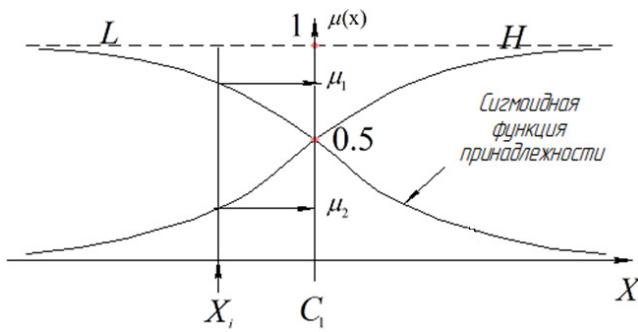


Рис.2.14. Сигмоидные функции принадлежности

При фазификации текущего отклонения параметра с помощью синглтона определяются степени принадлежности, сумма которых всегда равна единице. Любые возмущения в контурах не отражаются в текущих значениях степеней принадлежности. Для учета влияния возмущений дополнительно вводятся коэффициенты для коррекции текущих значений степеней принадлежности на выходе фазификатора, которые корректируются с помощью с помощью рекуррентной формулы (2.20) [102]:

$$h_{j+1} = h_j + B(x_j - x_{jm}) \frac{v_j}{v_j^T v_j}, \text{ при } 0 < B < 1. \quad (2.20)$$

Формирование скобки в формуле выполняется сумматором (см. рис. 2.13), выход которого сравнивается с текущим значением синглтона. Скорость работы алгоритма адаптации определяется значением коэффициента B , задаваемого в интервале $[0...1]$.

Преобразование нечеткой информации с выхода адаптивного фазификатора в измерителях и регуляторе НИ₁, НИ₂, НР выполняется с помощью уравнений Сугено (2.21) и рассмотрено на примере НР:

$$y_1 = 3(\omega_1^* - \omega_2^*); \quad y_2 = (\omega_1^* - \omega_2^*). \quad (2.21)$$

Согласно рис. 2.15 с помощью формулы средневзвешенного рассчитываем выход адаптивного нечеткого регулятора НР [18-20].

$$y = \frac{y_1 \cdot \omega_1^* + y_2 \cdot \omega_2^*}{\omega_1^* + \omega_2^*} = \frac{3 \cdot (0,65 - 0,25) \cdot 1,2 + (0,65 - 0,25) \cdot 0,4}{0,25 + 0,65} = 1,18,$$

где ω_1^* и ω_2^* – выход адаптивного фазификатора; y – выход адаптивного нечеткого регулятора НР.

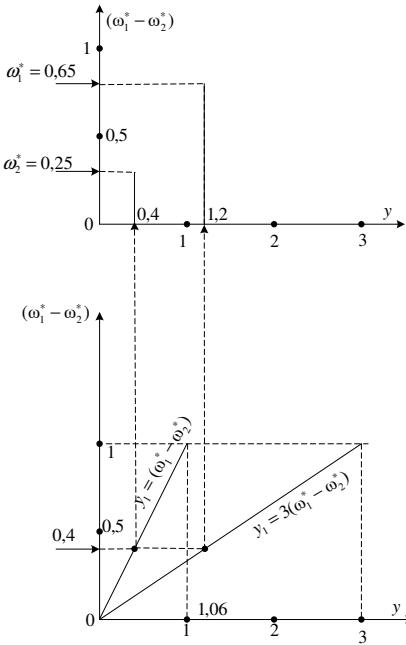


Рис.2.15. Графическое представление расчетной формулы дефазификатора
Особенностью данного варианта проектирования адаптивного измерителя вредных веществ, что здесь не требуется обучения с учителем.

2.2.4 Разработка структуры виртуального измерителя температуры в камере сгорания на базе нечеткой логики

Проектирование виртуальных адаптивных измерителей температуры камеры сгорания (КС) играет важную роль при работе газотурбинного двигателя, поскольку устойчивость горения пламени находится в зависимости от статической характеристики камеры сгорания и носит экстремальный характер. Известно, что радикальным способом борьбы с образованием окислов азота является температурное дожигание топлива, но повышение температуры и давления газа в КС влечет за собой увеличение выбросов эмиссии вредных веществ в частности окислов азота NO_x .

Одним из подходов решения данной проблемы, является применение виртуального нечеткого измерителя температуры на основе показаний которого, происходит регулирование расхода топлива в диффузионном коллекторе, тем самым контролируя температуру в заданных пределах с обеспечением тяги двигателя. Особенностью данного адаптивного виртуального измерителя температуры является то, что он непрерывно измеряет температуру в КС газотурбинного двигателя (ГТД) в реальном времени и может быть альтернативой термопары.

Недостатками термопары является точечное измерение температуры и наличие инерционности, что недопустимо при диффузионном горении пламени и применении в системах реального времени.

Аналогично построению измерителей окислов азота и коэффициента камеры сгорания сформирована структура виртуального температурного датчика, где для каждого входа в блоке фазификации используются асимметричные сигмоидные функции принадлежности. Нечеткая композиция выполнена с применением уравнений Сугено, а дефазификация – с применением метода среднего взвешенного значения.

В качестве входных переменных выступают следующие параметры: Gt – расход топлива в камере сгорания (кг/ч); n_v – частота вращения ротора вентилятора (об/мин); n_{v_d} – частота вращения ротора высокого давления (об/мин).

Для проектирования архитектуры виртуального измерителя температуры необходимы нормированные репрезентативные выборки, приведенные в табл. 2.5.

Таблица 2.5 – Исходные нормированные данные расчета виртуального измерителя температуры

Режимы работы	Входы			Выход
	\bar{G}_t	\bar{n}_v	$\bar{n}_{v_д}$	
«Взлет»	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
	0,1124	0,0565	0,3640	0,1078
	0,2547	0,1259	0,7292	0,2089
	0,3966	0,1950	1,0896	0,3082
	0,4923	0,2406	1,2872	0,3582
	0,5078	0,2474	1,2999	0,3592
	0,5016	0,2443	1,2836	0,3547
	0,4994	0,2433	1,2804	0,3540
	0,4998	0,2435	1,2816	0,3544
	0,5000	0,2436	1,2821	0,3545
	0,5000	0,2436	1,2820	0,3545
	0,5000	0,2436	1,2820	0,3545
	0,5000	0,2436	1,2820	0,3545
	0,5000	0,2436	1,2820	0,3545
«Набор»	0,5503	0,2696	1,4931	0,4208
	0,6945	0,3401	1,8570	0,5207
	0,8371	0,4096	2,2226	0,6218
	0,9635	0,4707	2,5178	0,7006
	1,0073	0,4909	2,5869	0,7156
	1,0042	0,4891	2,5710	0,7105
	0,9998	0,4870	2,5626	0,7085
	0,9996	0,4869	2,5631	0,7087
	1,0000	0,4871	2,5640	0,7090
	1,0000	0,4872	2,5641	0,7090
	1,0000	0,4871	2,5640	0,7089
	1,0000	0,4871	2,5640	0,7089
	1,0000	0,4871	2,5640	0,7089
	0,9980	0,4860	2,5382	0,6997

Таблица 2.5 – Исходные нормированные данные расчета виртуального измерителя температуры (продолжение)

Режимы работы	Входы			Выход
	\bar{G}_t	\bar{n}_v	$\bar{n}_{v_д}$	
«Посадка ПМГ» и руление	0,8656	0,4199	2,1438	0,5856
	0,7232	0,3505	1,7780	0,4844
	0,5829	0,2823	1,4266	0,3880
	0,5014	0,2436	1,2674	0,3488
	0,4929	0,2402	1,2671	0,3507
	0,4991	0,2432	1,2816	0,3546
	0,5006	0,2439	1,2834	0,3548
	0,5002	0,2436	1,2822	0,3545
	0,5000	0,2436	1,2819	0,3544
	0,5000	0,2436	1,2820	0,3545
	0,5000	0,2436	1,2820	0,3545
	0,5000	0,2436	1,2820	0,3545

На рис. 2.16 приведена структура виртуального адаптивного измерителя температуры в камере сгорания (КС) газотурбинного двигателя (ГТД).

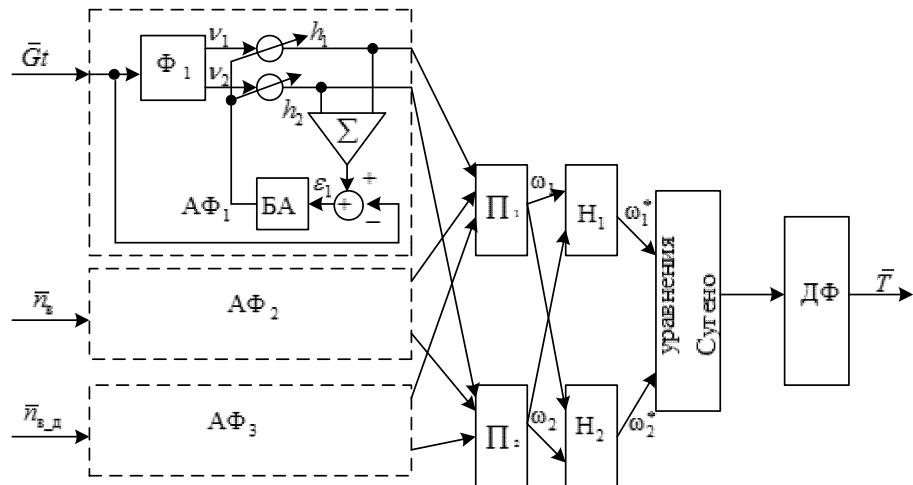


Рис. 2.16. Адаптивный виртуальный измеритель температуры за КС ГТД

При фазификации текущего отклонения параметра с помощью синглтона определяются степени принадлежности, сумма которых всегда равна единице. Любые возмущения в контурах не отражаются в текущих значениях степеней принадлежности

Преобразование нечеткой информации с выхода адаптивного фаззификатора в измерителе выполняется с помощью уравнений Сугено (2.21).

Практическая реализация и результаты моделирования разработанного измерителя температуры представлены в главе 3.

2.3 ВЫВОДЫ ПО ВТОРОЙ ГЛАВЕ

1. Разработан регрессионный метод измерения окислов азота с помощью одномерной оптимизации.
2. Рассмотрены модели измерителя окислов азота.
3. Рассмотрен алгоритм проектирования виртуальных адаптивных измерителей на базе персептрона.
4. Рассмотрен алгоритм проектирования измерителей на базе *RBF*-сети.
6. Рассмотрен алгоритм проектирования модифицированных адаптивных виртуальных измерителей на базе нечеткой логики с применением уравнений Сугено.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ЭМИССИЕЙ ОКИСЛОВ АЗОТА

Предложенные модели и методы синтеза устройств измерения и реализация элементов систем управления эмиссии окислов азота требуют исследования для подтверждения теоретических положений.

В данной главе приведены результаты апробации:

- разработанной динамической математической модели управления эмиссией оксидов азота на базе регрессионного метода одномерной оптимизации;
- разработанных моделей построения виртуальных измерителей температуры, оксидов азота и коэффициента избытка воздуха в КС с использованием интеллектуальных систем, в частности персептрона, *RBF*-сети, нечеткого подхода и *Anfis*-сети.

Выполнен анализ полученных результатов исследований для динамической модели управления с учетом оптимизации и без учета оптимизации выбросов оксидов азота в изменяющихся условиях эксплуатации; анализ полученных результатов построения адаптивных виртуальных измерителей с учетом внешних климатических факторов.

Рассмотрена совместная работа разработанного метода оптимизации выбросов оксидов азота и моделей виртуальных измерителей и проведена систематизация данных, полученных в результате исследований.

3.1 Синтез динамической математической модели управления эмиссией оксидов азота на базе метода одномерной оптимизации

На рис 3.1 приведена структурная схема динамической модели управления эмиссией оксидов азота на базе регрессионного метода одномерной оптимизации с учетом перераспределения топлива по коллекторам.

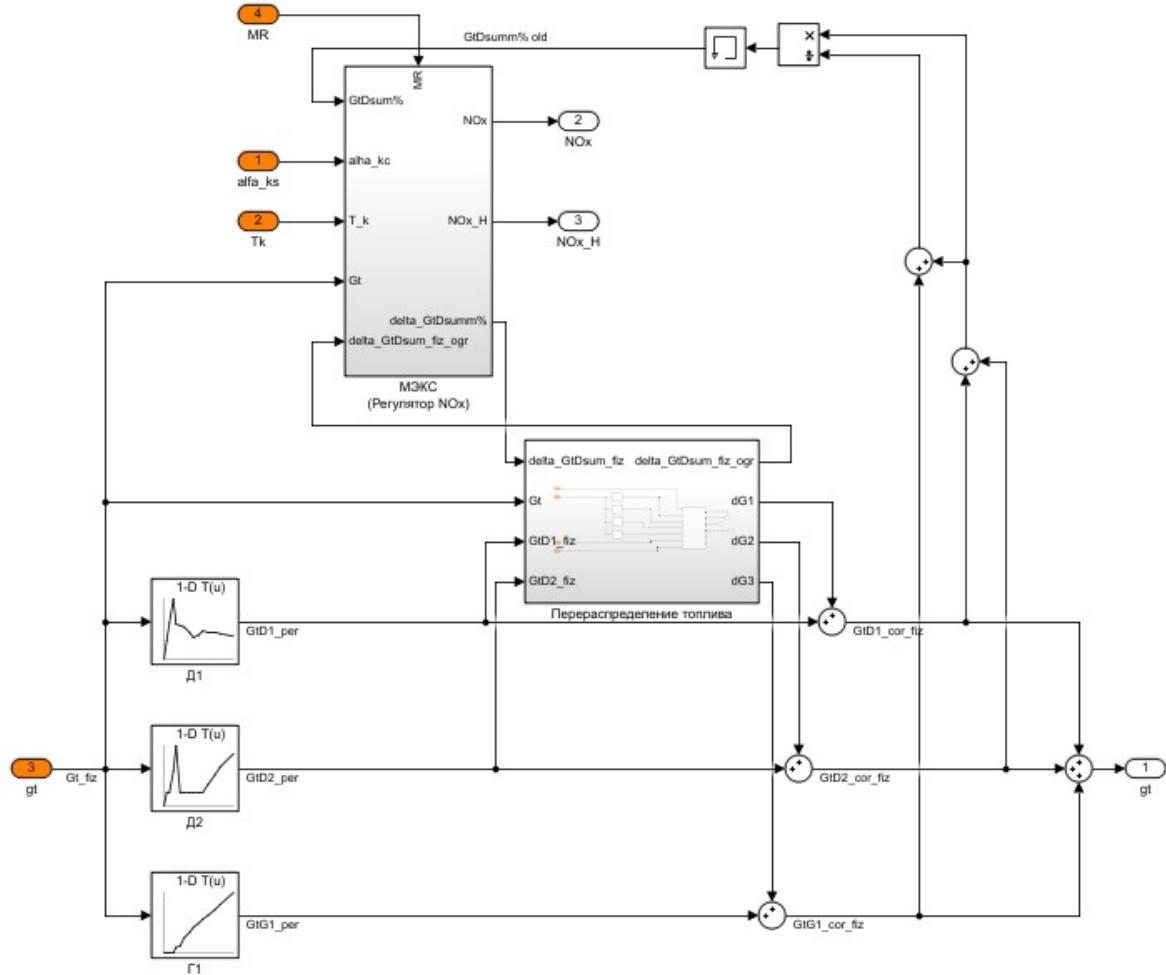


Рис. 3.1. Структурная схема модели управления эмиссией оксидов азота с учетом перераспределения топлива по коллекторам

На вход данной модели поступают параметры: Gt – суммарный расход топлива на режиме (кг/ч); MR – метка текущего режима полета; α_{kc} – коэффициент избытка воздуха (ед.); Tk – температура камеры сгорания (K).

Выходными параметрами модели являются: NO_x – интеграл эмиссии выбросов окислов азота с учетом ограничения высоты в 914 м. (кг); Gt – суммарный расход топлива на текущем режиме (кг/ч);

Пакет *Matlab Simulink* предоставляет возможность осуществить аппроксимацию с помощью встроенного блока «*1-D Lookup Table*». С помощью данного блока была осуществлена интерполяция по линейному закону функциональных зависимостей среднего расхода топлива на каждом из

коллекторов $\Delta 1$, $\Delta 2$, $\Gamma 1$, где Δ – диффузионный, Γ – гомогенный. Значения данных блоков формировались по формуле (3.1):

$$Gt_{(D1,D2,\Gamma 1)_{per}} = \frac{Gt_max - Gt_min}{2}, \quad (3.1)$$

где, Gt_max и Gt_min – максимальный и минимальный расход на коллекторе (кг/ч).

Далее поступающее количество топлива каждого из коллекторов подвергается коррекции на сумматорах $GtD1_cor_fiz$, $GtD2_cor_fiz$, $Gt\Gamma 1_cor_fiz$.

Блок «*Confines*» формирует диапазоны расхода топлива и поправку на каждый коллектор. Входными параметрами являются $delta_GtDsum_fiz$ – содержание топлива в диффузионном коллекторе (%); Gt – текущее суммарное топливо (кг/ч); $GtD1_fiz$ – выходное значение топлива в первом диффузионном коллекторе с блока $\Delta 1$ (кг/ч); $GtD2_fiz$ – выходное значение топлива во втором диффузионном коллекторе с блока $\Delta 2$ (кг/ч).

Выходные параметры: $delta_GtDsum_fiz_ogr$ – величина поправки суммарного расхода топлива в диффузионные коллекторы (%); $dG1$ – величина поправки топлива в первом диффузионном коллекторе (кг/ч); $dG2$ – величина поправки топлива во втором диффузионном коллекторе (кг/ч); $dG3$ – величина поправки топлива в гомогенном коллекторе (кг/ч).

Содержимое блока «*Confines*» представлена на рис. 3.2

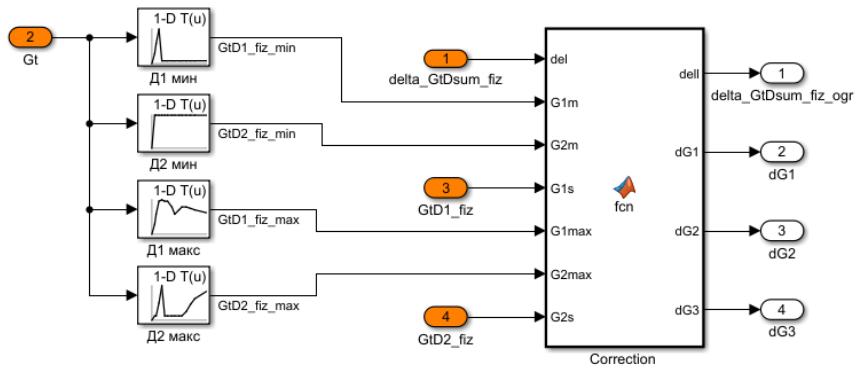


Рис. 3.2. Структурная схема блока «*Confines*»

С помощью встроенных средств *Matlab Simulink* сформированы блоки-ограничители, где $D1_{\min}$ – граница минимального уровня топлива, проходящего через первый (Д2 второй) диффузионный коллектор (кг/ч); $D1_{\max}$ – граница максимального уровня топлива, проходящего через первый (Д2 второй) диффузионный коллектор (кг/ч).

Организация процедуры работы поправок по распределению топлива выполнено в блоке «Correction». Листинг программной реализации с описанием работы представлен в приложении А.

Структурная схема блока «МЭКС (Регулятор NO_x)» представлена на рис. 3.3. Принцип работы представлен в разделе 2.1. Входными параметрами представленного блока являются: $GtDsum\%$ – текущее суммарное значение топлива в диффузионных коллекторах (%); Pk – давление за контуром высокого давления (КВД) (кгс/см²); Gt – суммарный расход топлива на режиме (кг/ч); Tk – температура камеры сгорания (К); MR – метка текущего режима полета; $\delta GtDsum_fiz_ogr$ – величина поправки суммарного расхода топлива в диффузионные коллекторы (%).

Выходными параметрами являются: NO_x – интеграл выбросов окислов азота (кг); $\delta GtDsum\%$ – суммарное приращение топлива в диффузионных коллекторах (%).

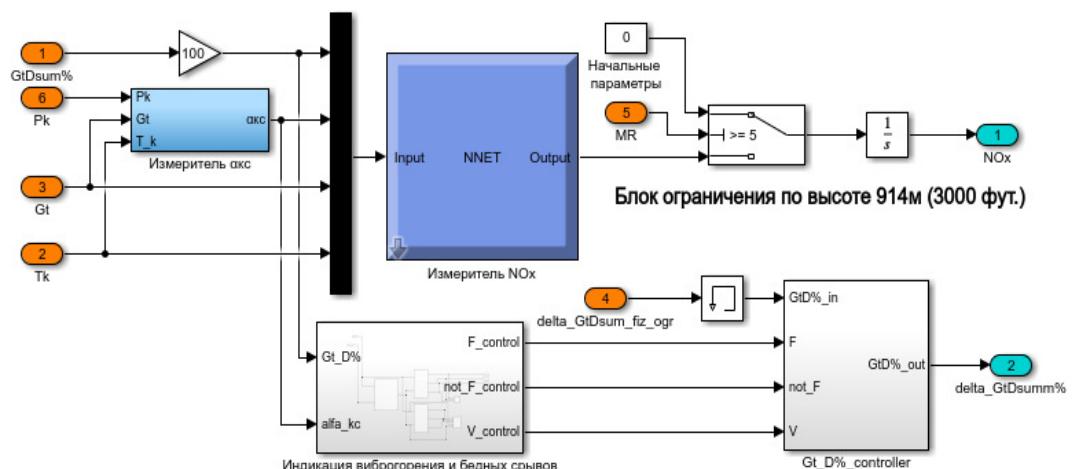


Рис. 3.3. Структурная схема блока «МЭКС (Регулятор NO_x)»

Параметр $GtDsumm\%$ формируется формулой (3.2).

$$GtDsumm\% = \frac{Gt_{D1_тек} + Gt_{D2_тек}}{Gt_{сумм.}} \cdot 100\% \quad (3.2)$$

Из высказанного в главе 2 отмечено, что статическая эксперт-модель не учитывает особенности динамического режима работы МЭКС, на котором могут возникнуть недопустимые для полетных условий режимы: «бедного» срыва и виброгорения, поскольку расчет производится с временем задержки 6...10 с. Поэтому при построении регулятора, обеспечивающего минимизацию выбросов окислов азота на уровне 18 кг на среднестатистическом времени полета необходимо определить область устойчивого режима МЭКС, не допускающего режимы «бедного» срыва и виброгорения, что реализовано блоком «Индикация виброгорения и бедных срывов» см. рис. 3.3. Данные ограничения описаны в главе 2.

Блок « $Gt_D\%_controller$ » см. рис. 3.3 выполняет функцию «сужения» границ неопределенности D^* равный $[a^*, b^*]$ для того, чтобы реальных «бедных срывов» и «виброгорения» не возникало, где $a^* - (not F)$ граница частичного бедного срыва; $b^* - (V)$ граница виброгорения; F граница полного бедного срыва пламени.

Структурная схема реализованного алгоритма одномерной оптимизации концентрации эмиссии окислов азота см. раздел 2.1 представлена на рис. 3.4.

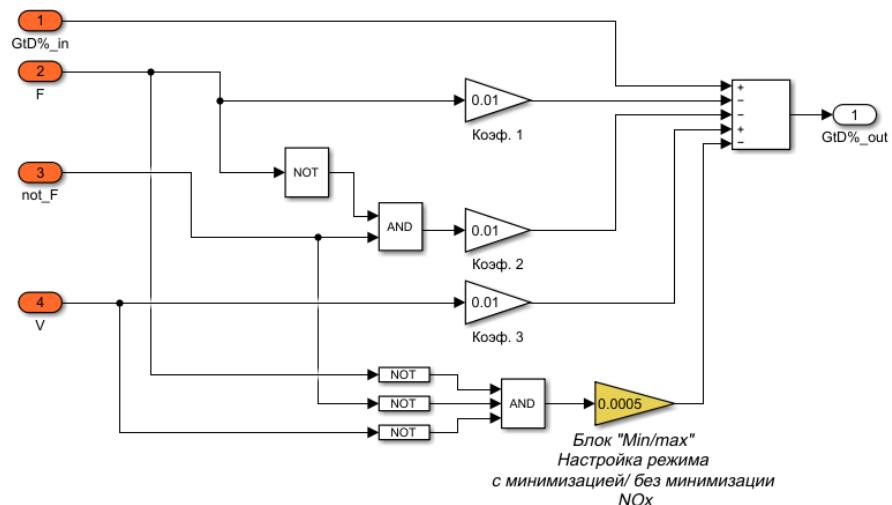


Рис. 3.4. Структура блока « $Gt_D\%_controller$ »,

где $GtD\%_{in}$ – величина поправки суммарного расхода топлива в диффузионные коллекторы с задержкой на 1 такт (%); $GtD\%_{out}$ – величина топлива, поступающая в диффузионные коллекторы после регулирования (%);

Работа структурной схемы « $Gt_D\%_{controller}$ » описывается следующим образом:

- при «Полном бедном срыве*» уменьшается $GtD\%_{out}$ % (до 0.99 от фактического значения);
- при «Частичном бедном срыве*» увеличивается $GtD\%_{out}$ % (до 1.01 от фактического значения);
- при «Виброгорении*» увеличивается $GtD\%_{out}$ % (до 1.1 от фактического значения);

Если ни один из перечисленных режимов не активировался, то уменьшается значение $GtD\%_{out}$ % блоком «Min/max» на величину малого приращения, например, 0 (режим с минимизацией интеграла выбросов окислов азота) или 1 (режим без минимизации).

Ниже представлены варианты модельно-ориентированного проектирования виртуальных измерителей коэффициента избытка воздуха (α_{kc}) и окислов азота (NO_x) в среде *Matlab Simulink*.

3.2 Выбор целевой функции и критерий оценки

Для определения оптимального варианта построения измерителей предложена следующая целевая функция (ЦФ) (3.3):

$$F = \alpha_1 \cdot (\bar{\sigma}_{\text{обуч.}} + \bar{\sigma}_{\text{тест.}}) + \alpha_2 \cdot \bar{N} + \alpha_3 \cdot \bar{t} \rightarrow \min, \quad (3.3)$$

где α_1 , α_2 , α_3 – весовые коэффициенты целевой функции; $\bar{\sigma}_{\text{обуч.}}$ – нормированные значения отклонений от обучающей выборки; $\bar{\sigma}_{\text{тест.}}$ – нормированные значения отклонений от тестирующей выборки; \bar{N} – количество вычислительных операций (нормированные значения); \bar{t} – время вычислительных операций (нормированные значения).

Для целевой функции должно выполняться условие (3.4)

$$\sum_{i=1}^3 \alpha_i = 1 \quad (3.4)$$

Ниже представлены варианты построения целевой функции с учетом весовых коэффициентов:

при одинаковых весовых коэффициентах $\alpha_1 = 0,33; \alpha_2 = 0,33; \alpha_3 = 0,33$:

$$F = 0,33 \cdot (\bar{\sigma}_{\text{обуч.}} + \bar{\sigma}_{\text{тест.}}) + 0,33 \cdot \bar{N} + 0,33 \cdot \bar{t} \rightarrow \min \quad (3.5)$$

с повышенным коэффициентом по отклонению от обучающей и тестирующей выборок $\alpha_1 = 0,6; \alpha_2 = 0,33; \alpha_3 = 0,33$:

$$F(\text{пр. } \sigma) = 0,6 \cdot (\bar{\sigma}_{\text{обуч.}} + \bar{\sigma}_{\text{тест.}}) + 0,2 \cdot \bar{N} + 0,2 \cdot \bar{t} \rightarrow \min \quad (3.6)$$

с повышенным коэффициентом по количеству вычислительных операций $\alpha_1 = 0,33; \alpha_2 = 0,6; \alpha_3 = 0,33$:

$$F(\text{пр. } N) = 0,2 \cdot (\bar{\sigma}_{\text{обуч.}} + \bar{\sigma}_{\text{тест.}}) + 0,6 \cdot \bar{N} + 0,2 \cdot \bar{t} \rightarrow \min \quad (3.7)$$

с повышенным коэффициентом по времени вычислительных операций $\alpha_1 = 0,33; \alpha_2 = 0,33; \alpha_3 = 0,6$:

$$F(\text{пр. } t) = 0,2 \cdot (\bar{\sigma}_{\text{обуч.}} + \bar{\sigma}_{\text{тест.}}) + 0,2 \cdot \bar{N} + 0,6 \cdot \bar{t} \rightarrow \min \quad (3.8)$$

3.3 Синтез моделей виртуальных измерителей на базе персептрона

Рассмотрим практическую реализацию виртуальных измерителей оксидов азота (NO_x) и коэффициента избытка воздуха КС ($\alpha_{KС}$) с использованием нейронной сети на базе персептрона.

Для проверки работоспособности нейронных сетей (НС) на базе персептрона и сравнения результатов моделирования построенных измерителей с экспериментальной моделью была построена модель среде *Matlab Simulink* (см. рис. 3.6).

Требования, предъявляемые к виртуальным измерительным устройствам:

- обеспечение режима работы в реальном времени;
- количество одновременно измеряемых параметров не более 4;
- интервал дискретизации (максимальный) при измерениях $T=20$ мс.;

- максимальная статистическая погрешность $E_{\text{ст.}}=5\%$;
- максимальная динамическая погрешность $E_{\text{дин.}}=5\%$;
- измерение исследуемых параметров на всех рабочих режимах.
- измерение исследуемых параметров в условиях изменения внешней среды:
 - Полные давление воздуха (P_{ex}^*) на входе в двигатель изменяется в диапазоне от 0.2 ед. (для высоты 12 км.) до 1,2 ед. (высота 0 км.);
 - Полная температура воздуха (T_{ex}^*) на входе в двигатель изменяется в диапазоне $-60 \dots +60^\circ\text{C}$.

На рис. 3.5 представлена общая структурная схема работы нейронной сети на базе персептрона, где X – вектор входных параметров; R – номер элемента входного вектора; S – номер нейрона в слое; W_i – весовые коэффициенты; b – поправочный коэффициент; n_i – результат суммы весовых и поправочных коэффициентов; a – выход скрытого слоя; y – выход нейронной сети.

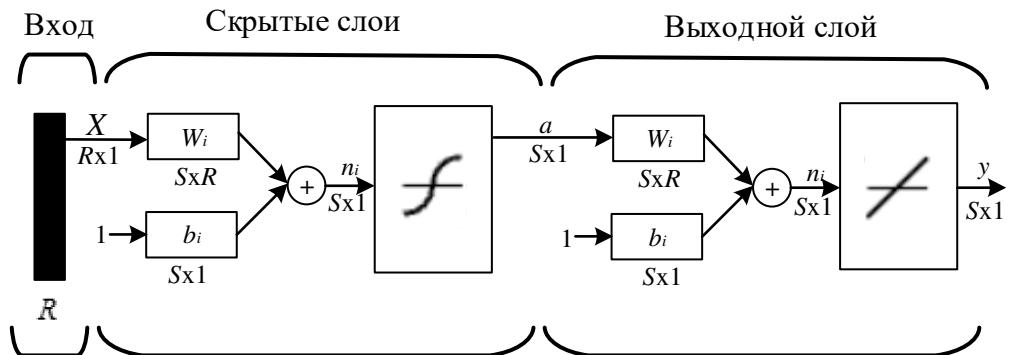


Рис. 3.5. Общая структурная схема работы нейронной сети на базе персептрона

На рис. 3.6 представлена структурная схема модели измерителя на базе персептрона. Разработанная НС не имеет обратных связей поэтому не имеет памяти, вследствие чего, выход полностью определяется текущими входами и значениями весовых коэффициентов что позволяет осуществлять работу в режиме реального времени. Обучение нейронной сети осуществлялось с учителем по методу Левенберга-Марквардта (ЛМ). Данный метод используется для оптимизации параметров нелинейных регрессионных моделей.

Предполагается, что в качестве критерия оптимизации используется среднеквадратичная ошибка модели на обучающей выборке.

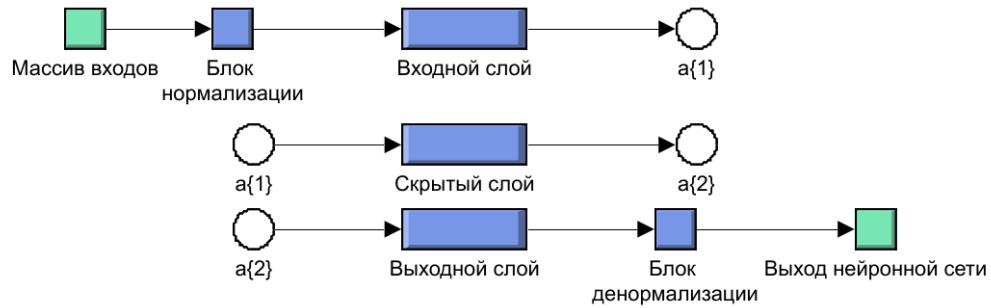


Рис. 3.6. Структурная схема измерителя на базе персептрона, где в качестве входного вектора выступают $GtDsum\%$ – текущее суммарное значение топлива в диффузионных контурах (%); Pk – давление за контуром высокого давления (КВД) ($\text{кгс}/\text{см}^2$); Gt – суммарный расход топлива на режиме ($\text{кг}/\text{ч}$); Tk – температура на выходе из камеры сгорания (K) для виртуального измерителя NOx . И Pk ($\text{кгс}/\text{см}^2$), Gt ($\text{кг}/\text{ч}$), Tk (K) для виртуального измерителя

$$\alpha_{kc}.$$

Входные величины имеют разную размерность, вследствие необходимо провести нормализацию факторов по формулам (3.9).

$$\begin{aligned}
 Pk_{выб.норм.} &= \frac{Pk_{выб.}}{Pk_{выб.max}}, \\
 Gt_{обуч.норм.} &= \frac{Gt_{обуч.}}{Gt_{обуч.max}}, \\
 Tk_{обуч.норм.} &= \frac{Tk_{обуч.}}{Tk_{обуч.max}}, \\
 Gt_D\%_{обуч.норм.} &= \frac{Gt_D\%_{обуч.}}{Gt_D\%_{обуч.max}}.
 \end{aligned} \tag{3.9}$$

где, $Pk_{выб.норм.}$, $Gt_{обуч.норм.}$, $Tk_{обуч.норм.}$, $Gt_D\%_{обуч.норм.}$ – нормализованные значения входных переменных с диапазоном от 0 до 1;

Структура входного и скрытых слоев НС представлена на рис. 3.7

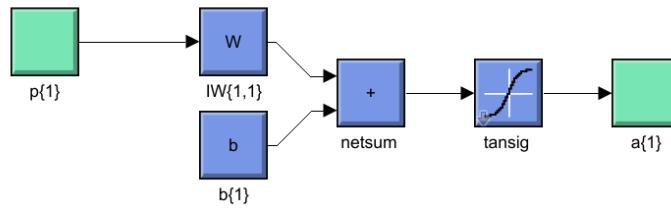


Рис. 3.7. Структурная схема входного и скрытых слоев нейронной сети на базе персептрона,

где $p(1)$ – вектор входных значений после нормализации; $tansig$ – функция активации Гаусса; $a(1)$ – выходной вектор.

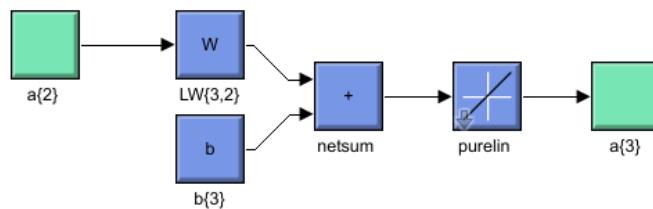


Рис. 3.8. Структурная схема выходного слоя нейронной сети на базе персептрона

Отличие модели выходного слоя (см. рис. 3.8) от скрытых заключается в функции активации (ФА), в выходном слое ФА представлено линейной зависимостью блок *purelin*.

Модели измерителей рассчитываются с шагом квантования 0,02 с.

3.3.1 Анализ функционирования моделей виртуальных измерителей на базе персептрона

Исследование нейронной сети проводилось на показатели точности (отклонение от обучающей выборки, отклонение от тестирующей выборки выраженное в процентах и количество вычислительных операций);

Анализ будет осуществлен для различных структур НС с различным количеством нейронов:

- для одного скрытого слоя

- 5 нейронов;
- 10 нейронов;
- 15 нейронов;
- 20 нейронов;
- 25 нейрона;
- 30 нейронов;
- для двух скрытых слоев (аналогично одному скрытому слою);

Полученные экспериментальные данные сведены в таблице 3.1.

Таблица 3.1 – Показатели точности различных вариантов построения нейронных сетей

Нейронная сеть	Отклонение от обучающей выборки, %	Отклонение от тестирующей выборки, %	Количество вычислительных операций, ед.	Время выполнения вычислительных операций, мс.
5 нейронов 1 слой	99,589	74,681	37	12,5
10 нейронов 1 слой	8,796	2,422	72	15,4
10 нейронов 2 слоя	1,744	0,551	72	14,3
15 нейронов 1 слой	0,641	0,276	114	12,4
15 нейронов 2 слоя	2,040	0,358	138	13,9
20 нейронов 1 слой	0,693	0,0413	142	12,6
20 нейронов 2 слоя	0,125	0,053	192	14,2
25 нейрона 1 слой	0,265	0,059	170	12,5
25	0,043	0,015	254	16,6

нейрона 2 слоя				
30 нейронов 1 слой	0,335	0,070	212	18,8
30 нейронов 2 слоя	0,021	0,007	362	21,0

Согласно требованиям, представленным выше допустимое отклонение измеряемого параметра от обучающей и тестирующей выборки не должно превышать 5%. И необходима минимальная вычислительная сложность построения сети. Отсюда на основании таблицы 3.1 построим зависимость среднего отклонения от количества нейронов в слое для однослойных (см. рис. 3.9), двухслойных (см. рис. 3.10) нейронных сетей-измерителей.

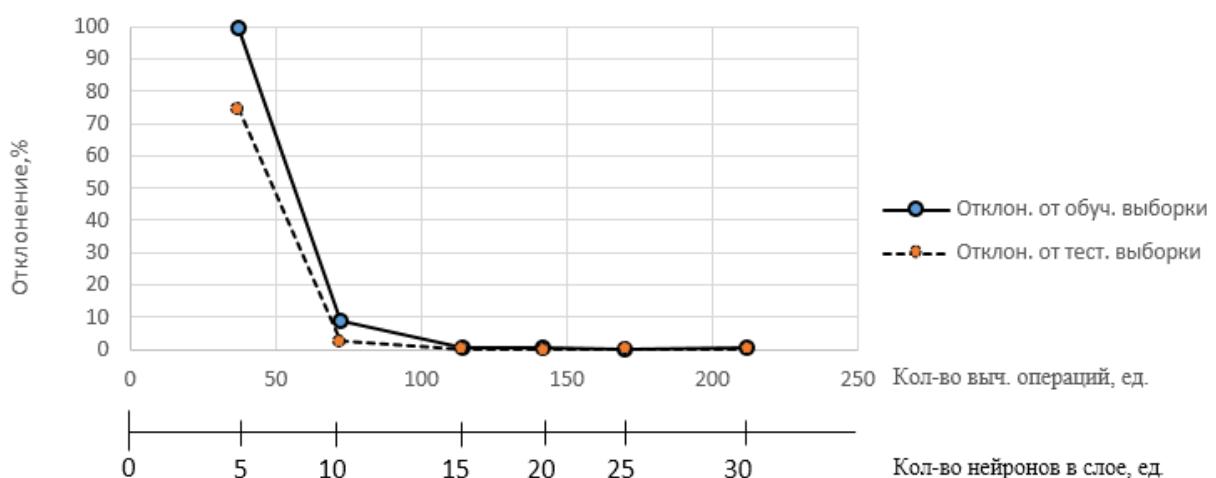


Рис. 3.9. Зависимость среднего отклонения от количества нейронов в однослойных нейронных сетях

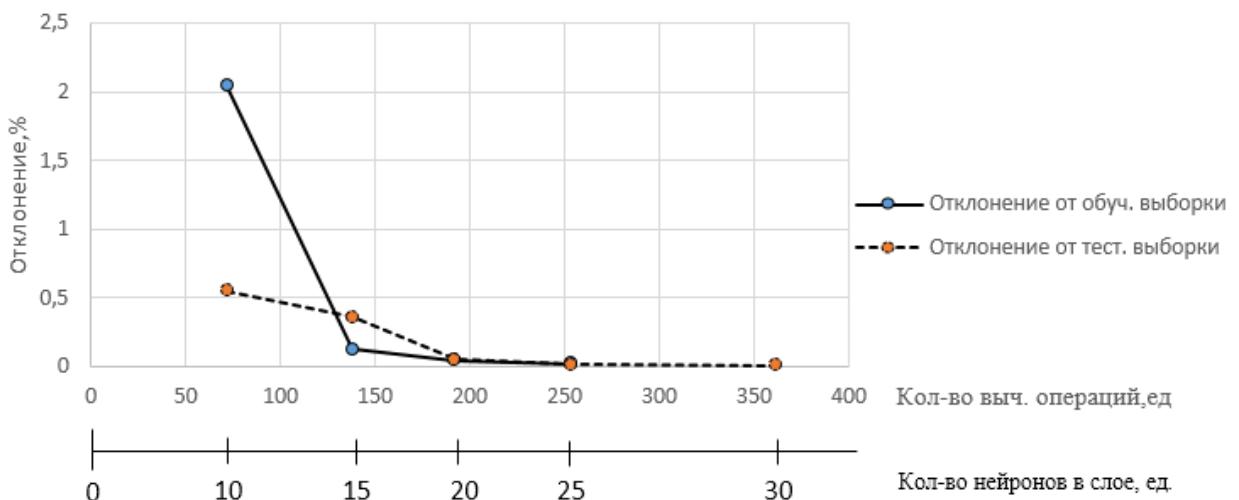


Рис. 3.10. Зависимость среднего отклонения от количества нейронов в двухслойных нейронных сетях

Анализ экспериментальных данных (см. рис. 3.9, 3.10) для различных вариантов построения нейронных сетей на базе персептрона показал уменьшение погрешности от 99% до 0,0212% отклонения измеряемого параметра от обучающей и тестирующей выборки с увеличением количества нейронов в скрытом слое, а также количества самих слоев.

Однако, из представленных результатов эксперимента, количество вычислительных операций растет (от 37 до 362) с усложнением структуры построения нейронной сети, что увеличивает вычислительные затраты регулятора электронного двигателя (РЭД).

Для построения измерителей рекомендуемая структура нейронной сети на базе персептрона: 1 скрытый слой, количество нейронов в скрытом слое 15, погрешность – не хуже 5%, количество вычислительных операций – не более 150 ед. Фактические значения для нейронной сети на базе персептрона: 1 скрытый слой; 15 шт. – количество нейронов в скрытом слое; 0,641 % – отклонение от обучающей выборки; 0,276 % – отклонение от тестирующей выборки; 114 ед. – количество вычислительных операций; 12,4 мс. – время выполнения вычислительных операций.

На рис. 3.11 приведены экспериментальные результаты работы измерителя избытка воздуха на входе в камеру сгорания (α_{kc}) в сравнении с данными полученными на эксперт-модели на базе персептрана.

Эксперимент проведен на основных полетных режимах («Взлет», «Набор», «Снижение», «Заход на посадку (ПМГ)», «Руление (ЗМГ)»). Время моделирования 2400 с., что соответствует среднестатистическому времени работы авиационного ГТД.

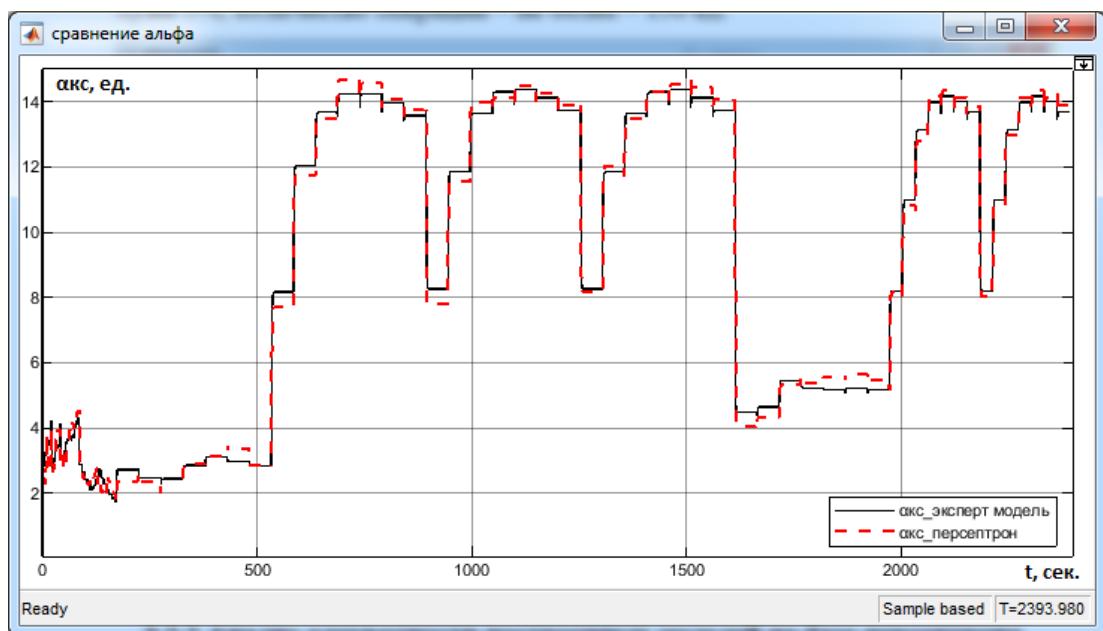


Рис. 3.11. Оциллограмма результатов работы измерителя на базе персептрана избытка воздуха на входе в камеру сгорания (α_{kc}) с результатами работы эксперт-модели за весь цикл «взлет-посадка»

Ниже (рис. 3.12...3.14) приведены результаты моделирования измерителя избытка воздуха на входе в камеру сгорания (α_{kc}) и измерителя окислов азота с результатами работы эксперт-модели на базе персептрана на высоте от 0 до 914 м, что соответствует режиму «Взлет». Используется 120 000 точек экспериментальных данных.

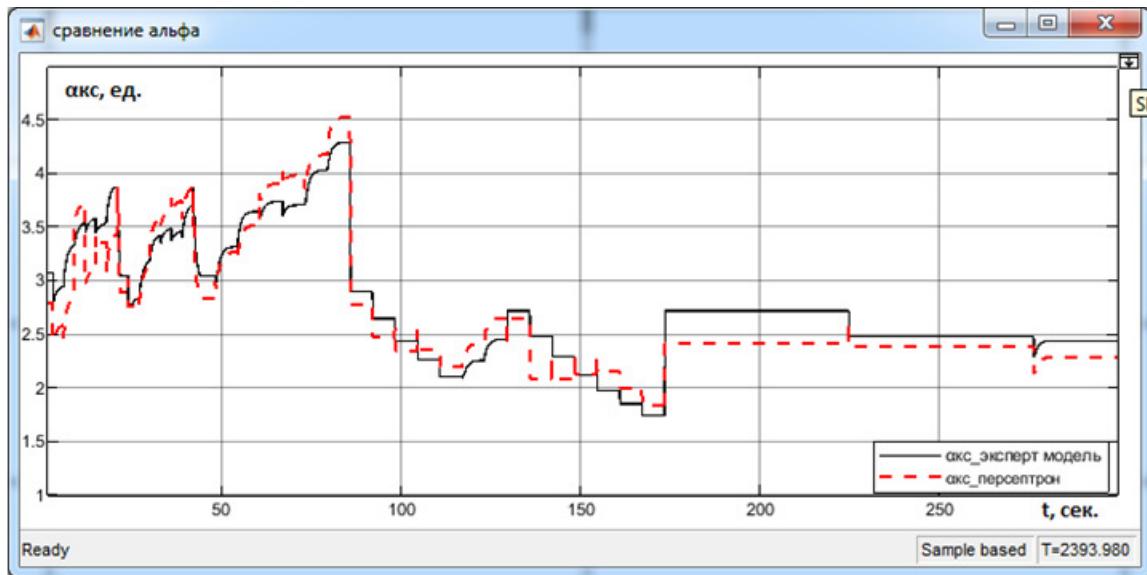


Рис. 3.12. Оциллограмма результатов работы измерителя на базе персептрона избытка воздуха на входе в камеру сгорания (α_{kc}) с результатами работы эксперт-модели на режимах «Взлет-набор»

Среднеквадратическая ошибка измерителя избытка воздуха на базе персептрона от эксперт-модели:

$$E_{\alpha_{kc}} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\alpha_{kc, \text{эксп.}} - \alpha_{kc, \text{перс.}})^2 = 0,651 \text{ ед.}$$

где n – количество точек экспериментальных данных; $\alpha_{kc, \text{эксп.}}$ – данные с эксперт-модели; $\alpha_{kc, \text{перс.}}$ – данные измерителя на базе персептрона.

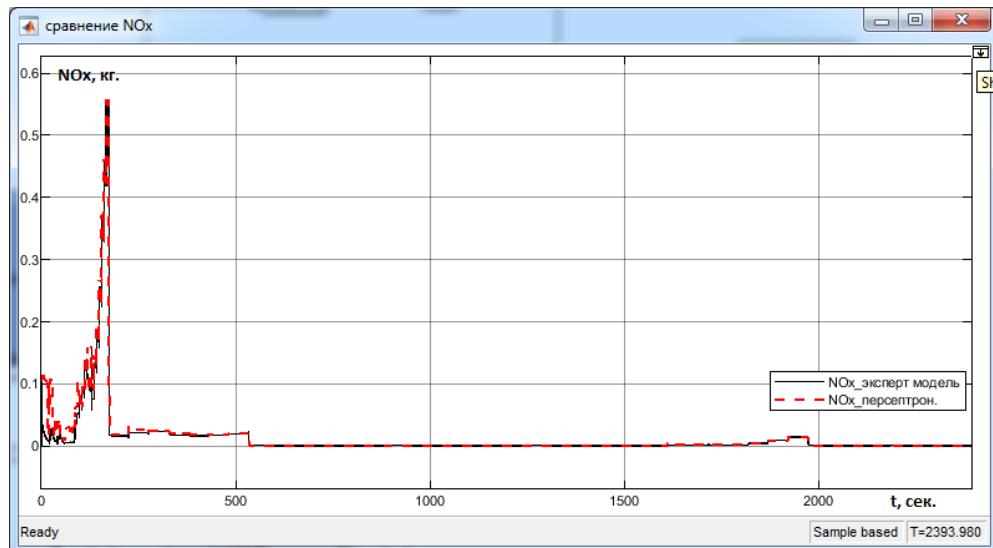


Рис. 3.13. Осциллограмма результатов работы измерителя на базе персептрана окислов азота с результатами работы эксперт-модели за весь цикл «взлет-посадка»

По результатам моделирования (рис.3.13) видно, что основное количество выбросов окислов азота происходит на режимах «Взлет-набор» при времени моделирования $t = 0 \dots 300$ сек.. Максимальное количество выбросов $NO_x = 0.55$ кг. происходит при времени $t = 160$ с. при максимальной тяге 35 тонн. На режимах «Снижение», «Заход на посадку (ПМГ)», «Руление (ЗМГ)» количество выбросов незначительное $NO_x = 0.0012 \dots 0.0018$ кг., в следствие этого при дальнейших экспериментах будет учитываться только режимы «Взлет-набор».

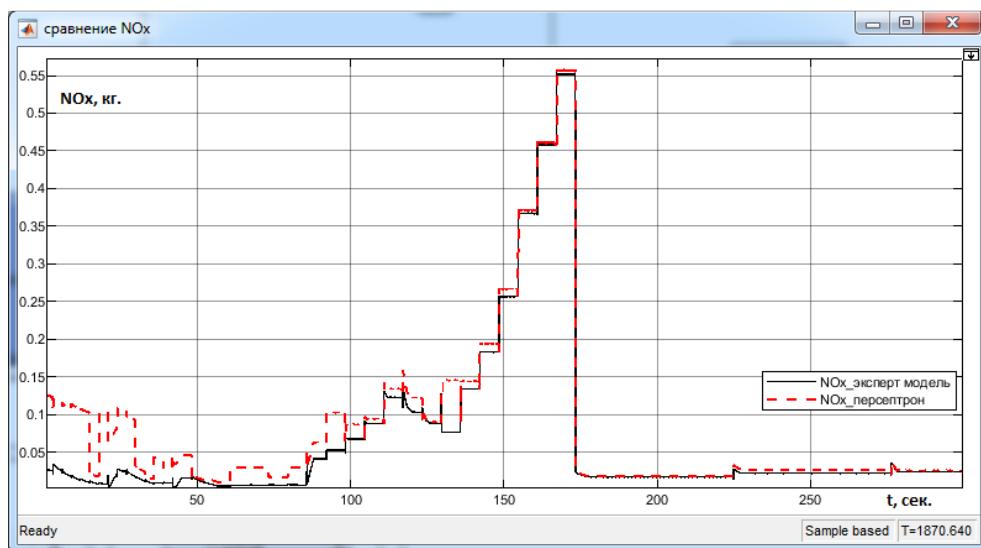


Рис. 3.14. Осциллограмма результатов работы измерителя на базе персептрана с результатами работы эксперт-модели на режимах «Взлет-набор»

Среднеквадратическая ошибка измерителя окислов азота на базе персептрана от эксперт-модели:

$$E_{NO_x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (NO_{x,\text{эксп.}} - NO_{x,\text{перс.}})^2 = 0,693 \text{ ед.}$$

где n – количество точек экспериментальных данных; $NO_{x,\text{эксп.}}$ – данные с эксперт-модели; $NO_{x,\text{перс.}}$ – данные измерителя на базе персептрана;

Анализ приведенных осцилограмм (см. рис. 3.11...рис. 3.14) подтвердил, что значения измерителей находятся в заданных пределах (ошибка меньше 5 ед.), что подтверждает правомочность замены статической модели измерителя α_{kc} и NO_x динамической моделью.

3.3.2 Анализ адекватности построенных моделей на базе персептрона

Графические результаты работы измерителей оксидов азота и коэффициента избытка воздуха КС см. на рис. 3.12, 3.14.

Для проверки адекватности моделей был выбран критерий Фишера, который позволяет сравнивать величины выборочных дисперсий двух рядов наблюдений.

Расчетное значение коэффициента находится по формуле (3.10)

$$F_{\text{расчетное}} = \frac{\sum (y_i \text{ расчетное} - y_{\text{среднее расчетное}})^2}{m} \cdot \frac{n-m-1}{\sum (y_i - y_i \text{ расчетное})}, \quad (3.10)$$

Где, m – количество факторов влияющих на выход; n – количество наблюдений; $y_i \text{ расчетное}$ – значения, описывающие изменения целевого показателя проверяемой модели; $y_{\text{среднее расчетное}}$ – среднее значение, описывающее изменения целевого показателя проверяемой модели; y_i – текущие значения, описывающие изменения целевого показателя основной модели. Если расчётное значение коэффициента Фишера окажется больше табличного (3.11), значит построенная зависимость хорошо отражает исходные данные снятые с эксперт-модели.

$$F_{\text{расч.}} > F_{\text{табл.}} \quad (3.11)$$

$F_{\text{табл.}}$ – это максимально возможное значение критерия под влиянием случайных факторов при данных степенях свободы и уровне значимости α . Уровень значимости α – вероятность отвергнуть правильную гипотезу при условии, что она верна. Обычно α принимается равной 0,05 или 0,01.

Оценка критерия проводится на всем взлетно-посадочном цикле с временем моделирования $t=2400$ сек.

Результаты расчетов критерия Фишера представлены в таблице 3.2.

Таблица 3.2 – Результаты расчетов критерия Фишера.

Измеритель	$F_{\text{расчетное}}$	$F_{\text{табличное}} (\text{для точности } 95\%)$
α_{kc}	280,15	2,44
NO_x	312.62	2,44

На основании таблицы 3.2 справедливо утверждение, что разработанные модели измерителей являются адекватными с точностью 95%.

3.4 Синтез моделей виртуальных измерителей на базе RBF-сети

Для проверки работоспособности виртуальных измерителей на базе RBF-сети и сравнения результатов моделирования построенных измерителей с экспертомоделью были построены модели среде *Matlab Simulink* (см. рис. 3.15, 3.16).

Структурная схема измерителя α_{kc} в среде *Matlab Simulink* представлена на рис. 3.15.

Модель состоит из блоков нормализации, RBF-сети и блока денормализации, реализованной аналогично построению НС на базе персептрона.

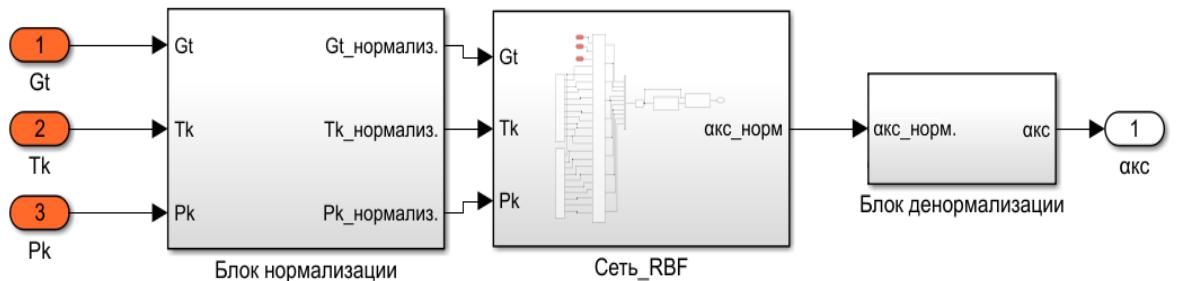


Рис. 3.15. Структурная схема измерителя α_{kc} в среде *Matlab Simulink*

где, в качестве входных величин выступают Pk – давление за контуром высокого давления (КВД) ($\text{кгс}/\text{см}^2$); Gt – суммарный расход топлива на режиме ($\text{кг}/\text{ч}$); Tk – температура на выходе из камеры сгорания (K) для виртуального

измерителя α_{kc} . И α_{kc} (ед.), Gt (кг/ч), Tk (K), $GtDsum\%$ для виртуального измерителя NO_x (см. рис.3.16).

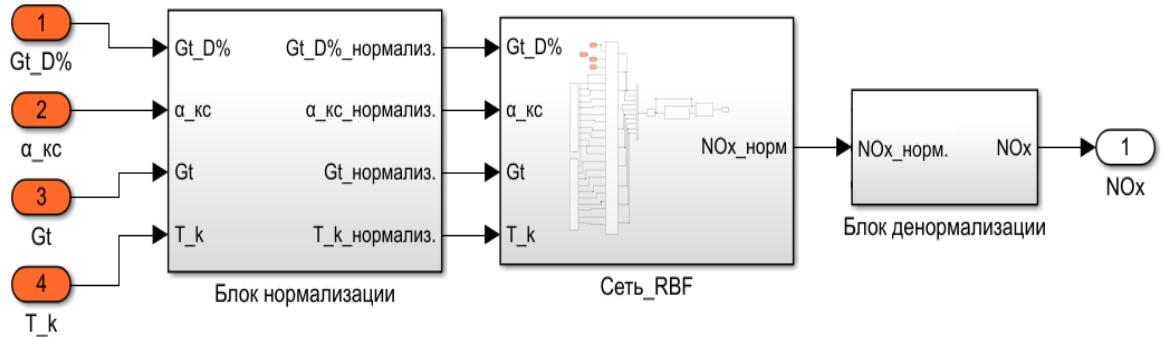


Рис. 3.16. Структурная схема измерителя NO_x в среде Matlab Simulink

Содержимое блока «Сеть_RBF» представлена на рис. 3.17

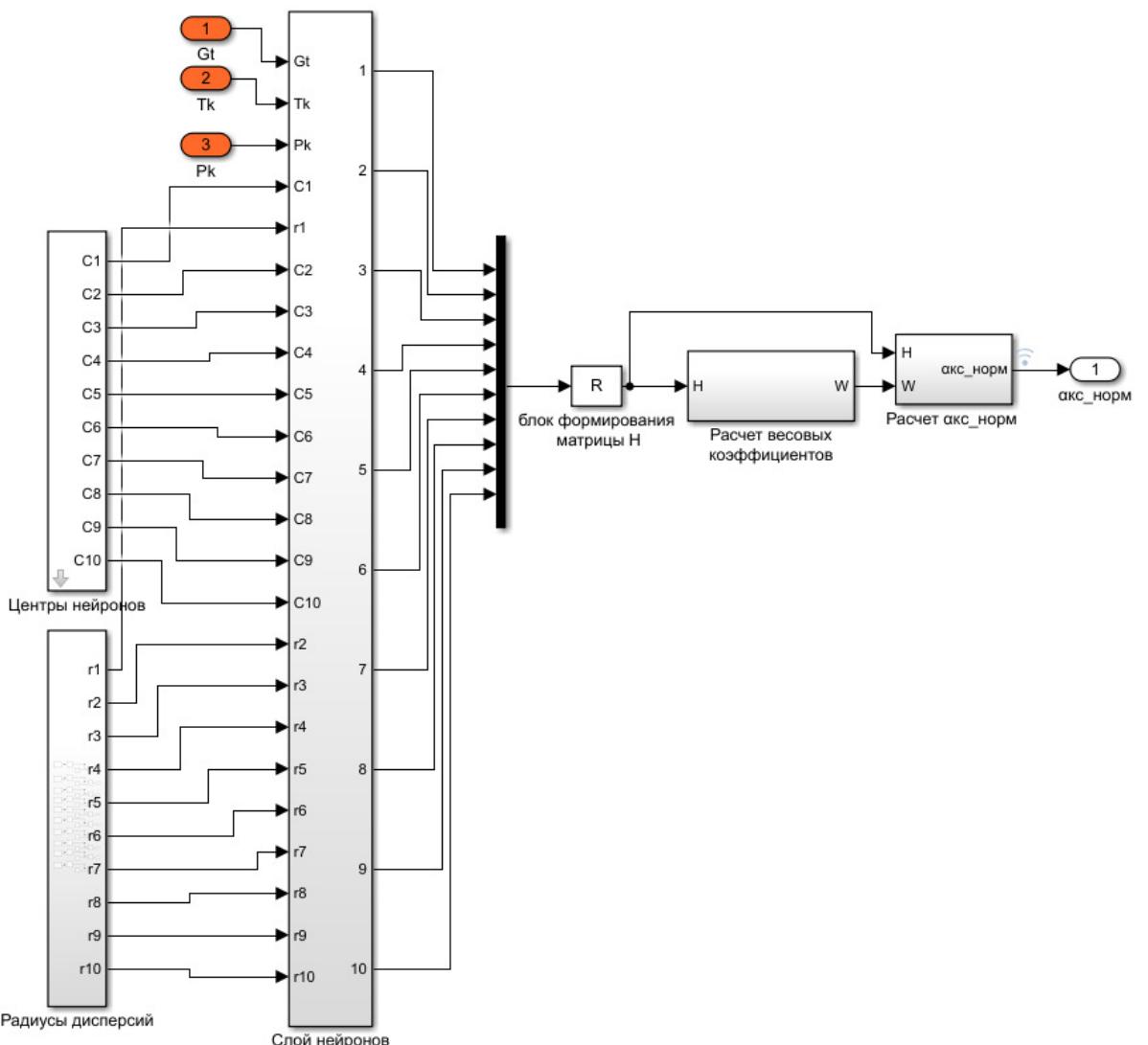


Рис. 3.17. Структурная схема содержимого блока «Сеть_RBF» в среде Matlab Simulink

где, C_i – координаты центров радиально–базисных нейронов; r_i – радиусы дисперсий; R – блок формирования матрицы H .

Аналогично проводится проектирование архитектуры адаптивной *RBF*-сети для расчета текущих значений NO_x .

Реализация структуры скрытых нейронов в соответствии с матрицей Грина согласно формулам (2.2).

3.4.1 Анализ функционирования моделей виртуальных измерителей на базе RBF-сети

Анализ адаптивной *RBF*-сети проводился на показатели точности (отклонение от обучающей выборки, отклонение от тестирующей выборки выраженное в процентах и количество вычислительных операций);

RBF-сеть очень чувствительна к величине дисперсии σ для активационной функции φ , а также к количеству нейронов в слое. Поскольку сеть на радиальных-базисных функциях подразумевает только один слой скрытых нейронов, то делается возможным прямой (не итеративный) расчет весов сети. В этом – их большое преимущество по сравнению с другими типами нейронных сетей, которые в большинстве случаев использую трудоемкие рекуррентные алгоритмы обучения.

Построение моделей измерителей проведено для различных вариантов дисперсий с различным количеством нейронов:

- для одного скрытого слоя (радиусы дисперсий для функций активации нейронов в скрытом слое $\sigma = 0,2; 0,4; 0,6; 0,8; 1$)
 - 3 нейронов;
 - 4 нейронов;
 - 5 нейронов;
 - 6 нейронов;
 - 7 нейронов;
 - 8 нейронов;

Полученные экспериментальные данные сведены в таблице 3.3.

Таблица 3.3 – Показатели точности различных вариантов построения RBF-сетей

Кол-во нейронов, шт.	Отклонение от обучающей выборки, %	Отклонение от тестирующей выборки, %	Количество вычислительных операций, ед.	Время выполнения вычислительных операций, мс.
$\sigma = 0.2$ ед.				
3	82,281	76,646	28	9,2
4	29,164	16,43	32	9,4
5	1,634	0,276	39	12,6
6	1,742	1,241	47	13,3
7	3,633	0,136	54	13,7
8	9,628	2,47	68	16,3
$\sigma = 0.4$ ед.				
3	63,281	72,381	28	9,2
4	29,164	13,852	32	9,4
5	2,811	0,552	39	12,6
6	0,634	0,059	47	13,3
7	0,633	0,036	54	13,7
8	0,628	0,083	68	16,3
$\sigma = 0.6$ ед.				
3	86,281	54,063	28	9,2
4	34,164	21,641	32	9,4
5	0,729	0,562	39	12,6
6	2,661	0,013	47	13,3
7	2,785	0,436	54	13,7
8	4,628	1,008	68	16,3
$\sigma = 0.8$ ед.				
3	95,454	72,381	28	9,2
4	76,381	34,508	32	9,4
5	19,442	12,552	39	12,6
6	7,261	2,403	47	13,3
7	15,997	5,036	54	13,7
8	28,815	8,583	68	16,3
$\sigma = 1$ ед.				
3	99,361	74,165	28	9,2
4	88,719	65,832	32	9,4
5	88,695	68,292	39	12,6
6	75,346	59,059	47	13,3
7	63,869	57,013	54	13,7
8	68,769	61,027	68	16,3

Используя информацию, что максимальное допустимое отклонение от обучающей и тестирующей выборки не должно превышать 5% и вычислительная сложность построенной сети должна быть минимальна. Построим на основании таблицы 3.3 зависимость среднего отклонения обучающей выборки от количества нейронов в скрытом слое *RBF*-сети и учетом количества вычислительных операций см. рис 3.18. А также построим зависимость среднего отклонения тестирующей выборки от количества нейронов в скрытом слое (рис.3.19).

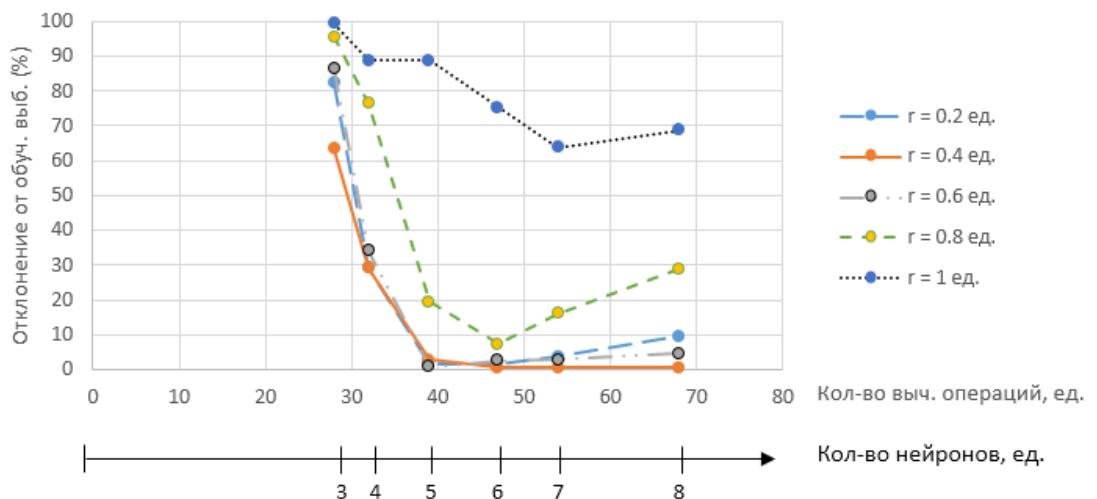


Рис. 3.18. Зависимость среднего отклонения обучающей выборки от количества нейронов *RBF*-сети при различных радиусах (σ) дисперсий

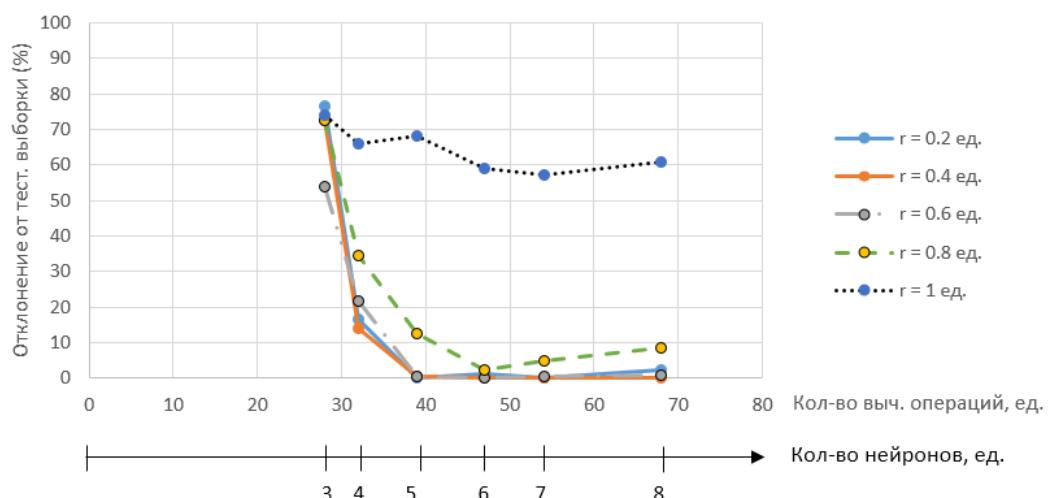


Рис. 3.19. Зависимость среднего отклонения тестирующей выборки от количества нейронов *RBF*-сети при различных радиусах (σ) дисперсий

Анализ экспериментальных данных (рис. 3.18) для различных вариантов построения *RBF*-сетей показал уменьшение отклонения от обучающей выборки с учетом изменений радиусов дисперсий с 99% до 0,628%. Отклонение от тестирующей выборки (рис. 3.19) изменялось с 76% до 0,013%.

Наилучший показатель по точностным характеристикам дала сеть с радиусом окружности построенной дисперсии $\sigma = 0.4$ и количеством нейронов в скрытом слое равным 6. Дальнейшее увеличение количества нейронов ведет к увеличению отклонения от обучающей и тестирующей выборок при различных вариантах изменения радиусов дисперсий.

Для дальнейшего построения измерителей рекомендуемая структура *RBF*-сети: 1 скрытый слой, количество нейронов в скрытом слое 6, погрешность – не хуже 5%, количество операций – не более – 50 ед. Фактические значения для нейронной сети на базе *RBF*-сети: 1 скрытый слой; 6 шт. – количество нейронов в скрытом слое; 0,634 % – отклонение от обучающей выборки; 0,059 % – отклонение от тестирующей выборки; 47 ед.– количество вычислительных операций; 13,3 мс. – время выполнения вычислительных операций.

Выбранная *RBF*-сеть удовлетворяет требованиям по вычислительным затратам и по времени выполнения вычислительных операций (не более 20 мс.) регулятором электронным двигателя (РЭД).

Сети *RBF* перед многослойными персепtronами имеют ряд преимуществ:

- моделируют произвольную нелинейную функцию с помощью одного промежуточного слоя, поэтому избавляют разработчиков от необходимости решать вопросы о числе слоев;
- веса входного слоя равны единице;
- параметры линейной комбинации в выходном слое можно полностью оптимизировать с помощью хорошо известных методов линейной оптимизации (при обучении отсутствует возможность попадания в локальный минимум, поэтому *RBF* обучается на порядок быстрее, чем многослойный персептрон).

Сложностью в процессе обучения *RBF*-сети является определения евклидового расстояния между желаемыми значениями и центров нейронов.

Еще одной сложностью построения сетей на основе радиально-базисных функциях является соблюдение условия пересечения окружностей подобранных дисперсий (графический метод) и сохранение масштабов исследуемых функций.

Результаты сравнения результатов работы измерителя на базе *RBF*-сети избытка воздуха на входе в камеру сгорания (α_{kc}) и измерителя окислов азота с результатами работы эксперт-модели на режимах «Взлет-набор» на высоте от 0 до 914 м. представлены на рис. 3.20, 3.21. Используется 120 000 точек экспериментальных данных.

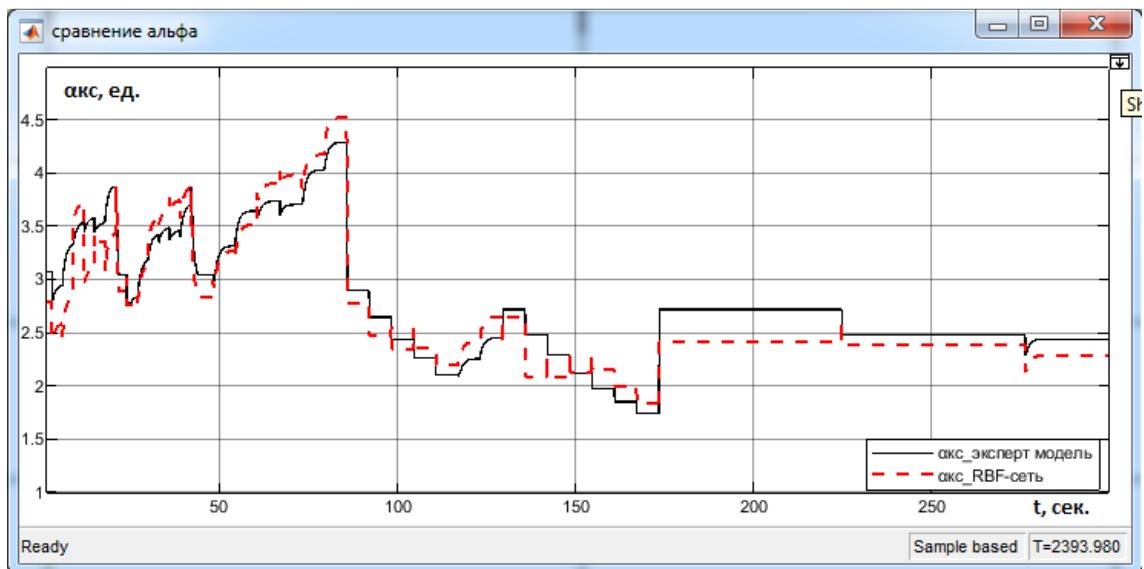


Рис. 3.20. Осциллограмма результатов работы измерителя на базе *RBF*-сети избытка воздуха на входе в камеру сгорания (α_{kc}) и работы эксперт-модели на режимах «Взлет-набор»

Среднеквадратическая ошибка измерителя избытка воздуха на базе *RBF*-сети от эксперт-модели:

$$E_{\alpha_{kc}} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\alpha_{kc, \text{эксп.}} - \alpha_{kc, RBF})^2 = 0,634 \text{ ед.}$$

где n – количество точек экспериментальных данных; $\alpha_{kc, \text{эксп.}}$ – данные с эксперт-модели; $\alpha_{kc, RBF}$ – данные измерителя на базе *RBF*-сети.

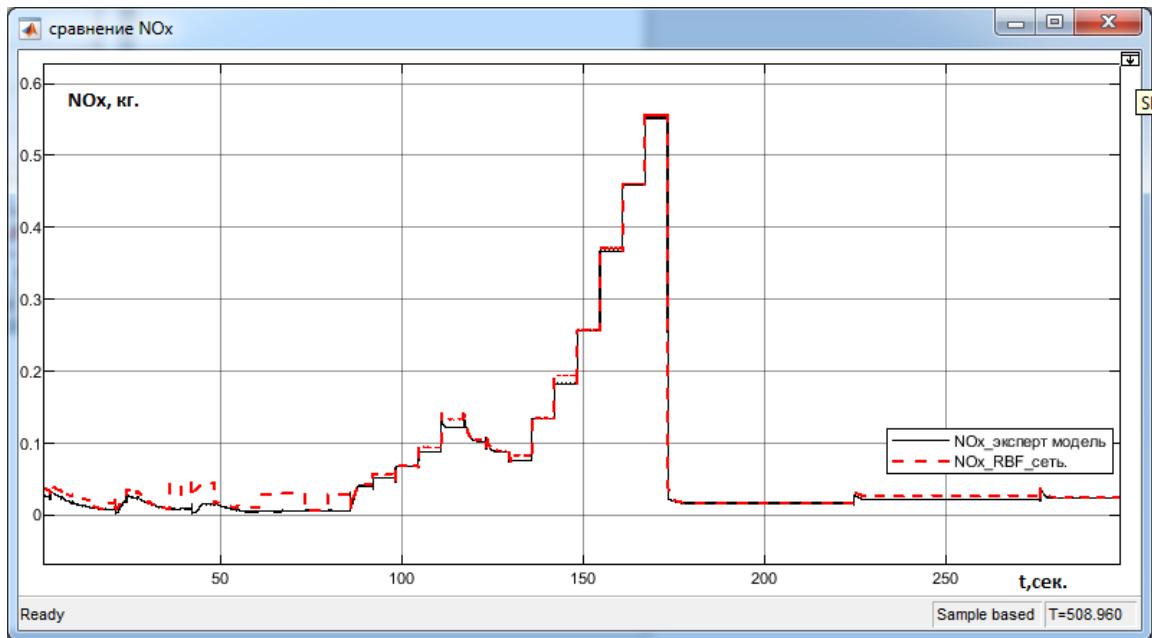


Рис. 3.21. Осциллограмма результатов работы измерителя на базе *RBF*-сети и эксперт-модели на режимах «Взлет-набор»

Среднеквадратическая ошибка измерителя окислов азота на базе *RBF*-сети от эксперт-модели:

$$E_{NO_x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (NO_{x,\text{эксп.}} - NO_{x,RBF})^2 = 0,361 \text{ ед.}$$

где n – количество точек экспериментальных данных; $NO_{x,\text{эксп.}}$ – данные с эксперт-модели; $NO_{x,RBF}$ – данные измерителя на базе *RBF*-сети;

Анализ приведенных осциллограмм (см. рис. 3.20, 3.21) подтвердил, что значения измерителей находятся в заданных пределах (ошибка меньше 5 ед.), что подтверждает правомочность замены статической модели измерителя a_{kc} и NO_x динамической моделью на базе *RBF*-сети.

3.4.2 Анализ адекватности построенных моделей на базе *RBF*-сети

Для проверки адекватности моделей был выбран критерий Фишера, который позволяет сравнивать величины выборочных дисперсий двух рядов наблюдений.

Оценка критерия проводится аналогично персепtronу (см. п. 3.2.2) на всем взлетно-посадочном цикле с временем моделирования $t=2400$ с.

Результаты расчетов критерия Фишера представлены в таблице 3.4.

Таблица 3.4 – Результаты расчетов критерия Фишера.

Измеритель	$F_{\text{расчетное}}$	$F_{\text{табличное}} (\text{для точности } 95\%)$
$\alpha_{\text{кс}}$	318,54	2,44
NO_x	562,28	2,44

На основании таблицы 3.4 справедливо утверждение, что разработанные модели измерителей являются адекватными с точностью 95%.

3.5 Синтез моделей виртуальных измерителей на базе нечеткой логики

Принципиально другим подходом к построению измерителей с измерителями оксидов азота (NO_x) и коэффициента избытка воздуха на входе в камеру сгорания ($\alpha_{\text{кс}}$) состоит в применении нечеткого подхода.

Представленные в предыдущих подразделах процедуры формирования измерителей имеют следующие недостатки:

Измерители на базе персептрона:

- Локальные минимумы в процессе обучения.

ЛМ разновидность градиентного спуска, то есть осуществляет спуск вниз по поверхности ошибки, непрерывно подстраивая веса в направлении к минимуму. Поверхность ошибки сложной сети сильно изрезана и состоит из холмов, долин, складок и оврагов в пространстве высокой размерности. Сеть может попасть в локальный минимум (неглубокую долину), когда рядом имеется гораздо более глубокий минимум.

- Паралич сети.

В процессе обучения сети значения весов могут в результате коррекции стать очень большими величинами. Это может привести к тому, что все или большинство нейронов будут функционировать при очень больших значениях OUT , в области, где производная сжимающей функции очень мала. Так как посылаемая обратно в процессе обучения ошибка пропорциональна этой производной, то процесс обучения может практически замереть.

- Проблема размерности шага обучения.

Если размер шага фиксирована в процессе обучения и очень мал, то сходимость слишком медленная, если же он фиксирован и слишком велик, то может возникнуть паралич или постоянная неустойчивость.

- Сложность структуры модели и низкое быстродействие.

Одним из ключевых факторов, является ограничение мощности РЭД. Построение сложных систем требует большие вычислительные возможности платформы.

Измерители на базе *RBF*-сети:

- Дисперсия для радиально-базисных функций.

Способность сети адекватно реагировать на наличие возмущающих воздействий определяется радиусом дисперсий для каждой функции активации. Неправильный подбор радиусов ухудшает показатели качества построенной модели.

- Евклидово расстояние.

Сложностью в процессе обучения *RBF*-сети является определения евклидового расстояния между желаемыми значениями и центров нейронов. Точность аппроксимации функций напрямую зависит от расположения центров нейронов. Неправильное расположение центров ухудшает показатели качества построенной сети.

Существующие недостатки разработанных измерителей на базе персептрона, *RBF*-сети, устраняются за счет применения нечеткого подхода с адаптацией.

Среди достоинств адаптивного нечеткого подхода построении измерителей можно выделить:

- Высокое быстродействие.

Нечеткие числа, получаемые в результате “не вполне точных измерений”, во многом аналогичны распределениям теории вероятностей, но по сравнению с вероятностными методами, методы нечеткой логики позволяют резко

сократить объем производимых вычислений, что, в свою очередь, приводит к увеличению быстродействия нечетких систем.

- Обеспечение желаемой точности измерений.

Настройка положения терм фаззификатора и индивидуальная настройка выходов правил позволяет добиться желаемой точности измерений.

- Обучение без учителя.

Измерители на основе нечеткого подхода не требуют обучения и, как следствие, обучающих выборок, являются прозрачными в настройке. Однако есть трудности с априорным (неполным) определением правил базы знаний и построением функции принадлежности для каждого значения лингвистических переменных. При этом параметры функций принадлежности выбираются субъективно, они могут быть не вполне адекватны реальной действительности

- Низкие аппаратные затраты и прозрачность формирования выходного сигнала устройства измерения.

Недостатки построения нечетких измерителей:

- Проблема выбора числа терм и функций принадлежности терм-множества для лингвистической переменной.
- Проблема формирования продукционных правил для достижения желаемых значений выхода измерителя.
- Отсутствие стандартной методики проектирования и расчета нечетких систем.
- Увеличение входных переменных увеличивает сложность вычислений системы экспоненциально и затрудняет ее восприятие.

На рис. 3.22 представлена структурная схема измерителя α_{kc} на базе нечеткой логики, построенная в программной среде *Matlab Simulink*.

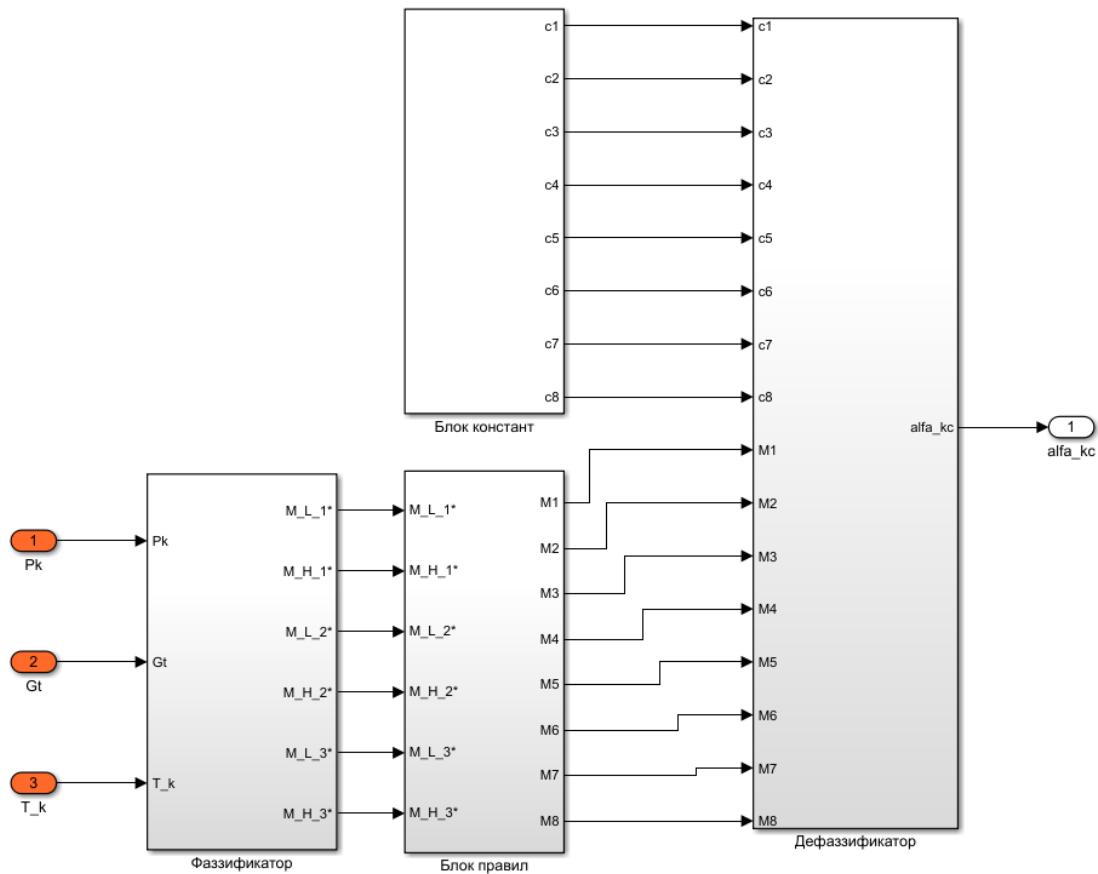


Рис. 3.22. Структурная схема измерителя α_{kc} на базе нечеткого подхода.

Нечеткий измеритель содержит адаптивный фаззификатор, блок правил, дефаззификатор, блок констант. Алгоритм работы предполагает для каждого входа в блоке фаззификации использовать две ассиметричные сигмоидные функций принадлежности (терм множества) на каждый вход, основание которых соответствуют нормированному интервалу $-1\dots+1$. Обучение выполнено без учителя.

На рис. 3.23 представлена структурная схема адаптивного фаззификатора измерителя α_{kc} .

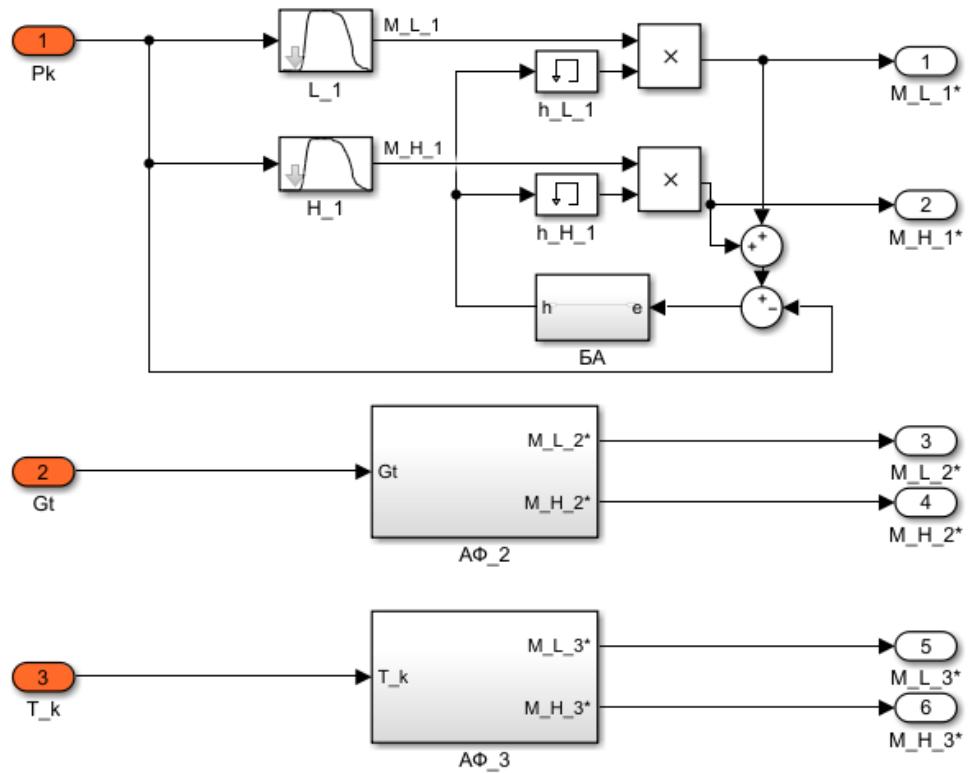


Рис. 3.23. Структурная схема адаптивного фазификатора измерителя α_{kc}

Процесс работы адаптивного фазификатора состоит из чередующих фаз. В первой фазе на входах задается входной вектор параметров ГТД, а на выходах – нужный выходной вектор. Затем веса всех связей M_L_1 , M_H_1 , соединяющих активные входы и выходы увеличиваются на малую величину h_{L_1} , h_{H_1} . Во второй фазе на выходе формируется тот же входной вектор, однако теперь блок адаптации (БА) решает, какой вектор сформировать на выходе. При этом должно соблюдаться следующее правило: выход активизируется только тогда, когда сумма весов его связей с активными входами положительна. После этого веса всех связей, соединяющих активные входные и выходные элементы, уменьшаются на величину h_{L_1} , h_{H_1} . Если сеть выработала правильный выходной вектор, то эти уменьшения весов в точности компенсируют их увеличение, произведенное в первой фазе, поскольку в обеих фазах активны одни и те же пары вход-выход. Если же сеть выработала не тот выходной вектор, который нужен, то изменение весов, рассчитанных в первой фазе, сохраняется.

Элемент сравнения в цепи обратной связи сравнивает фактический сигнал с выхода сумматора нейрона с желаемым сигналом (это может быть ошибка регулирования в САР или производная ошибки регулирования). Алгоритм адаптации подстраивает коэффициенты вектора входных сигналов так, чтобы свести к нулю ошибку e . Процедурно это организуется способом, описанным в главе 2.

В качестве функций принадлежности выбираются асимметричные сигмоидные функции, поддиапазоны которых равны и равномерно расположены в нормированном интервале $-1\dots+1$.

Основу синтеза измерителей с использованием нечеткой логики составляет база знаний, формируемая в виде совокупности нечетких предикатных правил.

Блок правил реализующий нейро-нечеткий измеритель a_{kc} представлена ниже. Количество правил зависит от количества входных параметров и терм.

Число терм терм-множеств фазификатора всегда должно быть равно числу подинтервалов разбиения нормированного интервала.

Структурная схема реализации базы правил (системы знаний) измерителя a_{kc} представлена в приложении В.

ЕСЛИ (Gt есть L) И (Tk есть L) И (Pk есть L), ТО (a_{kc} есть $outmf1$);
 ЕСЛИ (Gt есть L) И (Tk есть L) И (Pk есть H), ТО (a_{kc} есть $outmf2$);
 ЕСЛИ (Gt есть L) И (Tk есть H) И (Pk есть L), ТО (a_{kc} есть $outmf3$);
 ЕСЛИ (Gt есть L) И (Tk есть H) И (Pk есть H), ТО (a_{kc} есть $outmf4$);
 ЕСЛИ (Gt есть H) И (Tk есть L) И (Pk есть L), ТО (a_{kc} есть $outmf5$);
 ЕСЛИ (Gt есть H) И (Tk есть L) И (Pk есть H), ТО (a_{kc} есть $outmf6$);
 ЕСЛИ (Gt есть H) И (Tk есть H) И (Pk есть L), ТО (a_{kc} есть $outmf7$);
 ЕСЛИ (Gt есть H) И (Tk есть H) И (Pk есть H), ТО (a_{kc} есть $outmf8$).
 где L (Low) – упрощенное название терм «Низкий»; H ($Height$) – упрощенное название терм «Высокий»; $outmf1\dots outmf8$ – термы нечетких подмножеств выхода.

Аналогично проводится проектирование архитектуры адаптивного измерителя окислов азота NO_x .

Реализация структуры нечеткого измерителя NO_x с адаптивным фазификатором представлена на рис. 3.24.

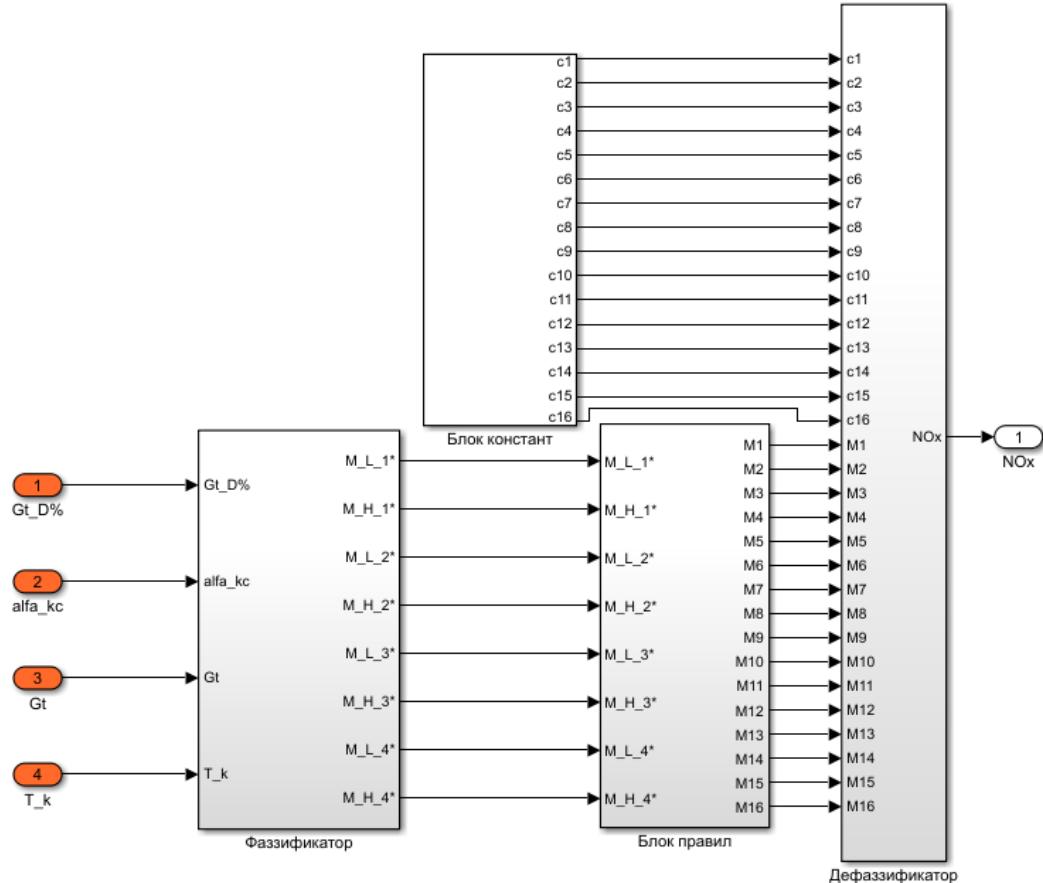


Рис. 3.24. Структурная схема измерителя NO_x на базе нечеткой логики, где $Gt_D\%$, $alfa_kc$, Gt , Tk – входные параметры измерителя; NO_x – значения выхода измерителя.

Отличие структуры измерителя NO_x от α_{kc} заключается формировании базы правил адаптивного фазификатора, реализация которого представлена ниже.

ЕСЛИ ($GtD\% \text{ есть } L$) И ($a_ks \text{ есть } L$) И ($Gt \text{ есть } L$) И ($Tk \text{ есть } L$) then ($NO_x \text{ есть } outmf1$);
 ЕСЛИ ($GtD\% \text{ есть } L$) И ($a_ks \text{ есть } L$) И ($Gt \text{ есть } L$) И ($Tk \text{ есть } H$) then ($NO_x \text{ есть } outmf2$);
 ЕСЛИ ($GtD\% \text{ есть } L$) И ($a_ks \text{ есть } L$) И ($Gt \text{ есть } H$) И ($Tk \text{ есть } L$) then ($NO_x \text{ есть } outmf3$);
 ЕСЛИ ($GtD\% \text{ есть } L$) И ($a_ks \text{ есть } L$) И ($Gt \text{ есть } H$) И ($Tk \text{ есть } H$) then ($NO_x \text{ есть } outmf4$);
 ЕСЛИ ($GtD\% \text{ есть } L$) И ($a_ks \text{ есть } H$) И ($Gt \text{ есть } L$) И ($Tk \text{ есть } L$) then ($NO_x \text{ есть } outmf5$);

ЕСЛИ ($GtD\%$ есть L) И (a_{ks} есть H) И (Gt есть L) И (Tk есть H) then (NOx есть $outmf6$);
 ЕСЛИ ($GtD\%$ есть L) И (a_{ks} есть H) И (Gt есть H) И (Tk есть L) then (NOx есть $outmf7$);
 ЕСЛИ ($GtD\%$ есть L) И (a_{ks} есть H) И (Gt есть H) И (Tk есть H) then (NOx есть $outmf8$);
 ЕСЛИ ($GtD\%$ есть H) И (a_{ks} есть L) И (Gt есть L) И (Tk есть L) then (NOx есть $outmf9$);
 ЕСЛИ ($GtD\%$ есть H) И (a_{ks} есть L) И (Gt есть L) И (Tk есть H) then (NOx есть $outmf10$);
 ЕСЛИ ($GtD\%$ есть H) И (a_{ks} есть L) И (Gt есть H) И (Tk есть L) then (NOx есть $outmf11$);
 ЕСЛИ ($GtD\%$ есть H) И (a_{ks} есть L) И (Gt есть H) И (Tk есть H) then (NOx есть $outmf12$);
 ЕСЛИ ($GtD\%$ есть H) И (a_{ks} есть H) И (Gt есть L) И (Tk есть L) then (NOx есть $outmf13$);
 ЕСЛИ ($GtD\%$ есть H) И (a_{ks} есть H) И (Gt есть L) И (Tk есть H) then (NOx есть $outmf14$);
 ЕСЛИ ($GtD\%$ есть H) И (a_{ks} есть H) И (Gt есть H) И (Tk есть L) then (NOx есть $outmf15$);
 ЕСЛИ ($GtD\%$ есть H) И (a_{ks} есть H) И (Gt есть H) И (Tk есть H) then (NOx есть $outmf16$).

где L (*Low*) – упрощенное название терм «Низкий»; H (*High*) – упрощенное название терм «Высокий»; $outmf1...outmf15$ – термы нечетких подмножеств выхода.

3.5.1 Анализ функционирования моделей виртуальных измерителей на базе нечеткой логики

Результаты сравнения результатов работы измерителя на базе нечеткой логики и избытка воздуха на входе в камеру сгорания (α_{kc}) и измерителя окислов азота с результатами работы эксперт-модели на режимах «Взлет-набор» на высоте от 0 до 914 м. представлены на рис. 3.25, 3.26. Используется 120 000 точек экспериментальных данных.

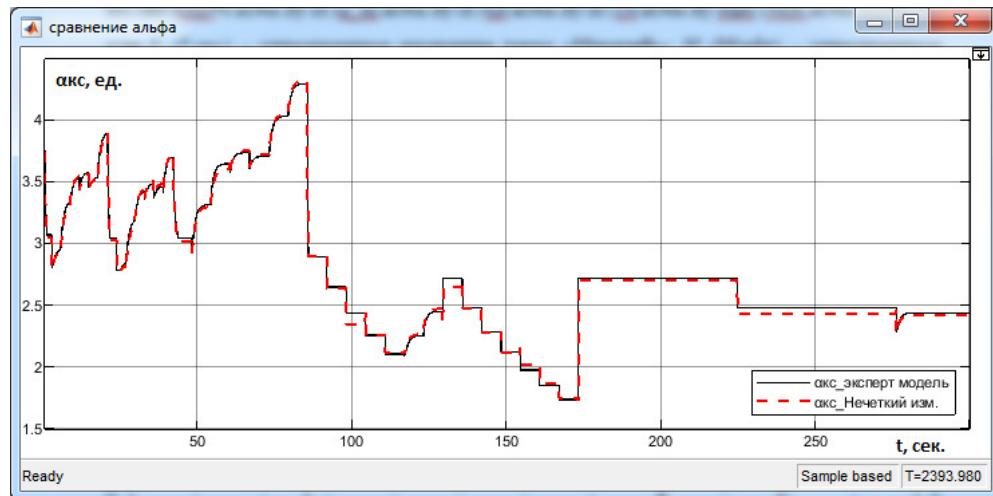


Рис. 3.25. Осциллограмма результатов работы измерителя на базе нечеткой логики избытка воздуха на входе в камеру сгорания ($\alpha_{\text{кс}}$) и эксперт-модели на режимах «Взлет-набор»

Среднеквадратическая ошибка измерителя избытка воздуха на базе нечеткой логики от эксперт-модели:

$$E_{\alpha_{\text{кс}}} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\alpha_{\text{кс.эксп.}} - \alpha_{\text{кс.неч.}})^2 = 0,0316 \text{ ед.}$$

где n – количество точек экспериментальных данных; $\alpha_{\text{кс.эксп.}}$ – данные с эксперт-модели; $\alpha_{\text{кс.неч.}}$ – данные измерителя на базе нечеткой логики.

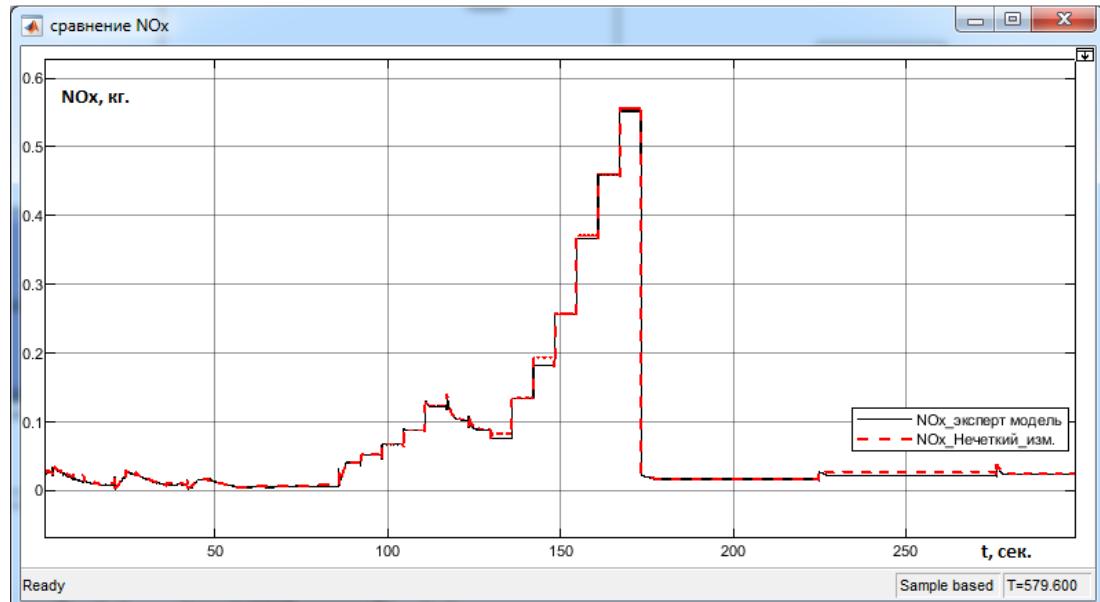


Рис. 3.26. Осциллограмма результатов работы измерителя на базе на базе нечеткой логики и эксперт-модели на режимах «Взлет-набор»

Среднеквадратическая ошибка измерителя окислов азота на базе нечеткой логики от эксперт-модели:

$$E_{NO_x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (NO_{x.\text{эксп.}} - NO_{x.\text{неч.}})^2 = 0,0214 \text{ ед.}$$

где n – количество точек экспериментальных данных; $NO_{x.\text{эксп.}}$ – данные с эксперт-модели; $NO_{x.\text{неч.}}$ – данные измерителя на базе нечеткой логики;

Анализ приведенных осциллограмм (см. рис. 3.25, 3.26) подтвердил, что значения измерителей находятся в заданных пределах (ошибка меньше 5 ед.), что подтверждает правомочность замены статической модели измерителя α_{kc} и NO_x динамической моделью на базе нечеткой логики.

3.5.2 Анализ адекватности построенных моделей на базе нечеткого подхода

Для проверки адекватности моделей был выбран критерий Фишера, который позволяет сравнивать величины выборочных дисперсий двух рядов наблюдений.

Оценка критерия проводится аналогично персепtronу (см. п. 3.2.2) на всем взлетно-посадочном цикле с временем моделирования $t = 2400$ с.

Результаты расчетов критерия Фишера представлены в таблице 3.5.

Таблица 3.5 – Результаты расчетов критерия Фишера.

Измеритель	$F_{\text{расчетное}}$	$F_{\text{табличное}} (\text{для точности } 95\%)$
α_{kc}	714,71	2,44
NO_x	936.82	2,44

На основании таблицы 3.5 справедливо утверждение, что разработанные модели измерителей являются адекватными с точностью 95%.

3.6 Сравнительный анализ результатов построения измерителей

В данном разделе приведены сводные таблицы по всем экспериментам построенных моделей измерителей α_{kc} и NO_x . Сравнительный анализ по расчетному значению критерия Фишера представлен в таблице 3.6.

Таблица 3.6 – Результаты сравнения измерителей по критерию Фишера.

Измеритель	Персепtron	<i>RBF</i> - сеть	Нечеткая логика
$F_{\text{табличное}} \text{ (для точности 95\%)} = 2,44$			
$F_{\text{расчетное}}$	$F_{\text{расчетное}}$	$F_{\text{расчетное}}$	
α_{kc}	280,15	318,54	714,71
NO_x	312.62	562.28	936.82

На основании сравнения результатов моделирования по критерию Фишера см. табл. 3.6 следует, что измерители, построенные на базе персептрана, *RBF* – сети уступают нечеткой логике. Наилучшие показатели для точности 95 % относительно эксперт-модели показывают измерители на базе нечеткой логики с $F_{\text{расчетное}} = 714,71$ для измерителя избытка воздуха (α_{kc}) и $F_{\text{расчетное}} = 936,82$ для измерителя окислов азота (NO_x), что на 60,8% и 66.6% лучше, чем измерители, построенные на базе персептрана, соответственно.

Оценка качества построения измерителей проводится по следующим критериям; $\sigma_{\text{обуч.}}$ – отклонение от обучающей выборки; $\sigma_{\text{тест.}}$ – отклонение от тестирующей выборки; N – количество вычислительных операций; t – время вычислительных операций. Ниже представлена сводная таблица результатов моделирования измерителей по отклонению, количеству вычислительных операций и времени вычислительных операций представлена.

Таблица 3.7 – Результаты моделирования измерителей по отклонению, количеству вычислительных операций и времени вычислительных операций.

Измеритель	Отклонение от обучающей выборки $\sigma_{\text{обуч.}}$ (%)	Отклонение от тестирующей выборки $\sigma_{\text{тест.}}$ (%)	Количество вычислительных операций N (ед.)	Время вычислительных операций t (мс.)
Персепtron	0,641	0,276	114	12,4
RBF - сеть	0,634	0,059	47	13,3
Нечеткая логика	0,012	0,0019	45	15,4

Далее, выполняется нормализацию показателей качества путем деления значений на максимальное значение в столбце и выражено в процентах. Результаты представлены в таблице 3.8.

Таблица 3.8 – Нормированные показатели результатов моделирования измерителей (совместно a_{kc} и NO_x) по отклонению, количеству вычислительных операций и времени вычислительных операций

Измеритель	Нормированное отклонение от обучающей выборки $\bar{\sigma}_{\text{обуч.}}$ (%)	Нормированное отклонение от тестирующей выборки $\bar{\sigma}_{\text{тест.}}$ (%)	Нормированное количество вычислительных операций \bar{N} (%)	Нормированное время вычислительных операций \bar{t} (%)
Персепtron	100,0	100,0	100,0	80,5
RBF - сеть	98,9	21,4	41,2	86,3
Нечеткая логика	1,8	0,7	39,5	100

По нормированным результатам экспериментов (табл. 3.5) и формуле (3.3) ЦФ имеет следующие значения:

$$F_{\text{персепtron}} = 125,57; F^{RBF-\text{сеть}} = 81,79; F^{\text{нечет.лог.}} = 46,87$$

Как видно из сравнения ЦФ при одинаковых весовых коэффициентах $\alpha_1 = 0,33; \alpha_2 = 0,33; \alpha_3 = 0,33$ наилучшие результаты показали измерители, построенные на нечеткой логике со значением $F^{\text{нечет.лог.}} = 46,87$.

Результаты сравнения ЦФ (3.4) с повышенным коэффициентом по отклонению от обучающей и тестирующей выборок при $\alpha_1 = 0,6; \alpha_2 = 0,2; \alpha_3 = 0,2$:

$$F_{(\text{пр. } \sigma)}^{\text{персептрон}} = 156,10; F_{(\text{пр. } \sigma)}^{\text{RBF-сеть}} = 97,68; F_{(\text{пр. } \sigma)}^{\text{нечет.лог.}} = 29,43.$$

Из сравнения ЦФ с повышенным коэффициентом по отклонению от обучающей и тестирующей выборок наилучшие результаты показали измерители, построенные на нечеткой логике со значением $F_{(\text{пр. } \sigma)}^{\text{нечет.лог.}} = 29,43$.

Результаты сравнения ЦФ (3.5) с повышенным коэффициентом по количеству вычислительных операций при $\alpha_1 = 0,2; \alpha_2 = 0,6; \alpha_3 = 0,2$:

$$F_{(\text{пр. } N)}^{\text{персептрон}} = 116,10; F_{(\text{пр. } N)}^{\text{RBF-сеть}} = 66,07; F_{(\text{пр. } N)}^{\text{нечет.лог.}} = 44,19$$

Из сравнения ЦФ с повышенным коэффициентом по количеству вычислительных операций наилучшие результаты показали измерители, построенные на нечеткой логике со значением $F_{(\text{пр. } N)}^{\text{нечет.лог.}} = 44,19$.

Результаты сравнения ЦФ (3.6) с повышенным коэффициентом по времени вычислительных операций при $\alpha_1 = 0,2; \alpha_2 = 0,2; \alpha_3 = 0,6$:

$$F_{(\text{пр. } t)}^{\text{персептрон}} = 108,31; F_{(\text{пр. } t)}^{\text{RBF-сеть}} = 84,12; F_{(\text{пр. } t)}^{\text{нечет.лог.}} = 68,41.$$

Из сравнения ЦФ с повышенным коэффициентом по времени вычислительных операций наилучшие результаты показали измерители, построенные на нечеткой логике со значением $F_{(\text{пр. } t)}^{\text{нечет.лог.}} = 68,41$.

Результаты моделирования измерителей по среднеквадратической ошибке относительно эксперт-модели представлены в таблице 3.9.

Таблица 3.9 – Результаты моделирования измерителей по среднеквадратической ошибке относительно эксперт-модели

Измеритель	Среднеквадратическая ошибка от эксперт-модели (ед.)	
	$\alpha_{\text{кс}}$	NO_x
Персепtron	0,651	0,693

<i>RBF</i> - сеть	0,634	0,361
Нечеткая логика	0,0316	0,0214

Анализ результатов проведенных экспериментов показал, что использование нечеткой логики в составе виртуальных измерителей МЭКС ГТД обеспечивает: *желаемую точность измерений*, поскольку результаты моделирования виртуальных измерителей по отклонению от обучающей и тестирующей выборок показали улучшение показателей качества более 98% по сравнению с персепtronом и более 80% в сравнении с измерителями, построенными на базе *RBF*-сети; *низкие аппаратные затраты*, из таблицы 3.7 видно снижение количества вычислительных операций при использовании нечеткого подхода при проектировании виртуальных измерителей более 60% в сравнении с персепtronом, но наблюдается рост времени вычислительных операций более чем 19%, поскольку расчет функций принадлежности Гаусса замедляет работу измерителей.

3.8 Результаты моделирования динамической модели управления эмиссией оксидов азота на базе регрессионного метода одномерной оптимизации

Цель эксперимента: выявить работоспособность динамической модели системы автоматического управления (САУ) эмиссии окислов азота; оценить качество управления режимов управления «с минимизацией» и «без минимизации» текущего уровня эмиссии; определить характер перераспределения топлива по диффузионным и гомогенному коллекторам с применением нечетких измерителей.

3.8.1 Постановка плана эксперимента

Эксперимент осуществляется на основе динамической модели САУ МЭКС по управлению выбросами (рис. 3.1).

План эксперимента включает в себя:

- анализ САУ на режимах с «минимизацией» и «без минимизации» текущего уровня эмиссии на высотах до 914 м. и без учета ограничения в 914 м. (в

соответствии с требованиями *ICAO* регулятор МЭКС должен обеспечить минимальный уровень эмиссии окислов азота NO_x – 18 кг при среднестатистическом цикле «взлет-посадка» времени моделирования $t = 2400$ с., на высотах до 914 м.);

- анализ САУ с учетом влияния внешней среды на работу малоэмиссионной камеры сгорания.
- определение характера перераспределения топлива по коллекторам;

Эксперимент проведен на основных полетных режимах («Взлет», «Набор», «Снижение», «Заход на посадку (ПМГ)», «Руление (ЗМГ)»). Для этого из таблицы 1.1 и МСА, воспользовавшись формулами приведения приложения Г получим таблицу 3.10.

Таблица 3.10 – Исходные данные для проведения эксперимента

Режимы	P_{ex}^* , атм.	T_{ex}^* , К	T_{ex}^* , °C	Gt , кг/ч	M_{π}	H_{π} , м	Время полета, мин.
Взлет	1,079	291,75	18,60	8940,6	0,25	0	0,35
	1,055	291,39	18,24	9219,7	0,33	457	0,35
Набор	1,055	291,39	18,24	7052,9	0,33	457	0,73
	0,617	267,50	-5,64	8998,8	0,61	6000	0,73
	0,371	247,95	-25,19	10740,5	0,85	11000	0,73
Снижение	0,371	247,95	-25,19	1681,6	0,85	11000	6
	1,064	292,16	19,01	539,5	0,35	457	6
Заход на посадку (ПМГ)	1,059	290,23	17,08	544,1	0,19	0	6
	1,059	290,22	17,07	544,1	0,19	0	6
	1,059	290,23	17,08	3211,9	0,19	0	6
Руление (ЗМГ)	1,033	288,15	15,00	559,9	0	0	3,5
	1,033	288,15	15,00	559,9	0	0	3,5

3.8.2 Результаты моделирования САУ выбросами окислов азота без учета возмущающих воздействий

На вход модели при заданных на основных полетных режимах («Взлет», «Набор», «Снижение», «Заход на посадку (ПМГ)», «Руление (ЗМГ)») подавались значения из таблицы 3.10.

Моделирование осуществлялось по режимам «с минимизацией» и «без минимизации» текущего уровня эмиссии.

Результаты моделирования на режиме «с минимизацией» с учетом ограничения по высоте полета 914 м. см. рис. 3.32.

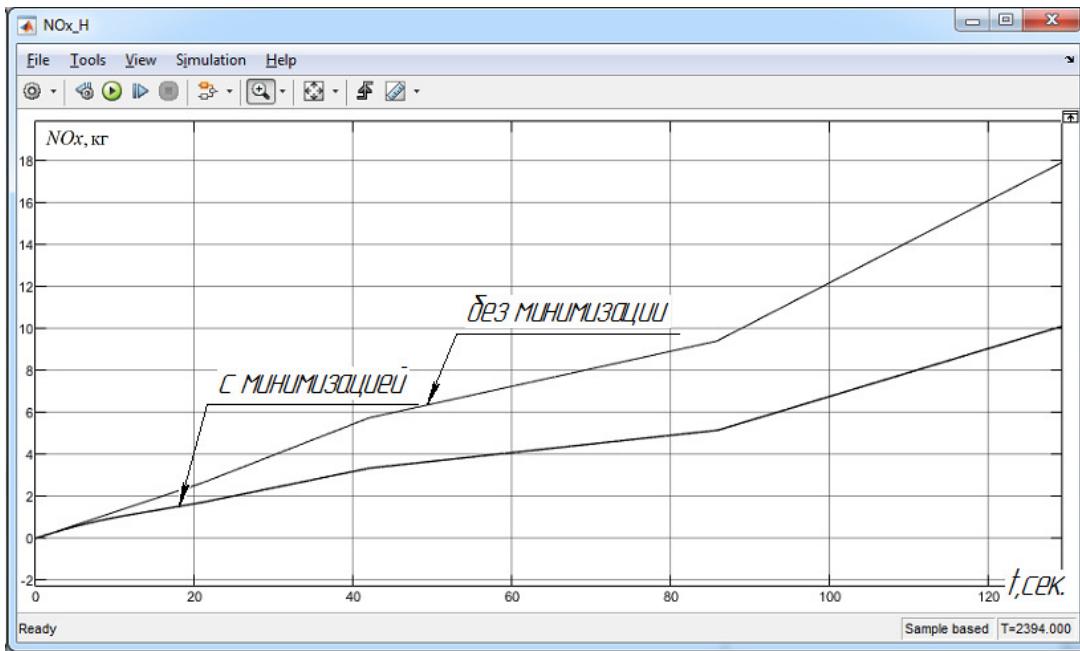


Рис. 3.32. Интегральный показатель окислов азота с учетом высоты 914 м.

На режиме «с минимизацией» интегральный показатель эмиссии окислов азота NO_x представленный на рисунке 3.32, не превышает 18 кг (фактическое значение 10 кг) на высоте полета до 914 м. при среднестатистическом времени полета 2400 сек.. На режиме «без минимизации» значения выбросов достигают 18 кг.

Далее приведены результаты моделирования САУ МЭКС на режимах «с минимизацией» и «без минимизации» выбросов окислов азота с учетом высотно-климатических условий полета (изменения температуры и давления на входе в двигатель).

3.8.3 Результаты моделирования САУ выбросами окислов азота с учетом возмущающих воздействий

Эксперимент осуществляется на основе динамической модели САУ МЭКС по управлению выбросами (рис. 3.1). В качестве возмущающих воздействий подразумевается в изменении полной температуры воздуха на входе (от -60 до $+60$) $^{\circ}\text{C}$ и изменения полного давления воздуха на входе в КС (атмосферного) (при изменении M_{π} – max полета от 0 до 1).

Для этого на вход модели при заданных на основных полетных режимах «Взлет», «Набор», «Снижение», «Заход на посадку (ПМГ)», «Руление (ЗМГ)» см. таблицу 3.10 подается возмущающее воздействие в виде ступенчатого изменения температуры воздуха на входе в двигатель (от -60 до $+60$) $^{\circ}\text{C}$ с шагом 10°C . В результате форму изменения сигнала температуры видно на рис. 3.33.

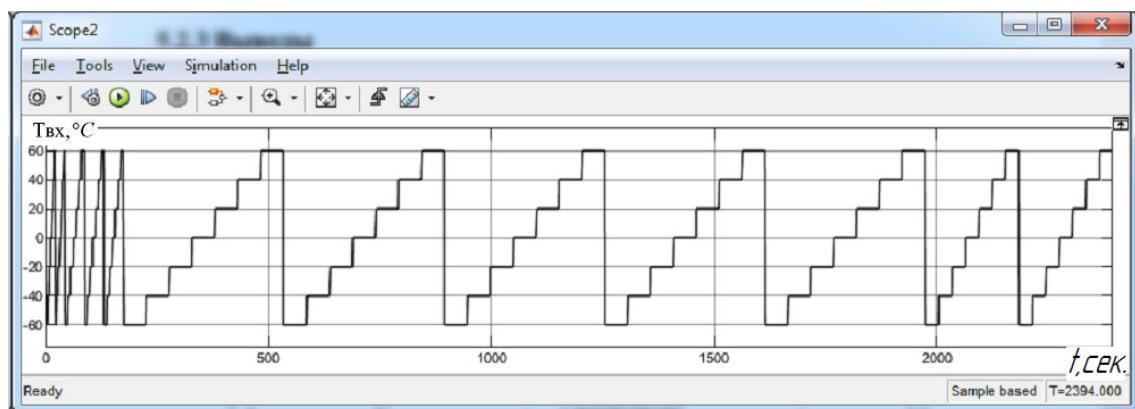


Рис. 3.33. Осциллограмма изменения внешней температуры на основных режимах полета

Диапазоны изменения давления $P_{\text{вх}}$ от 0.371 атм. на режиме «Снижение» до 1.89 атм. на режиме «Взлет», что отражает осциллограмма изменения внешнего давления на основных режимах полета (см. рис. 3.34) значения формировались на основании МСА.

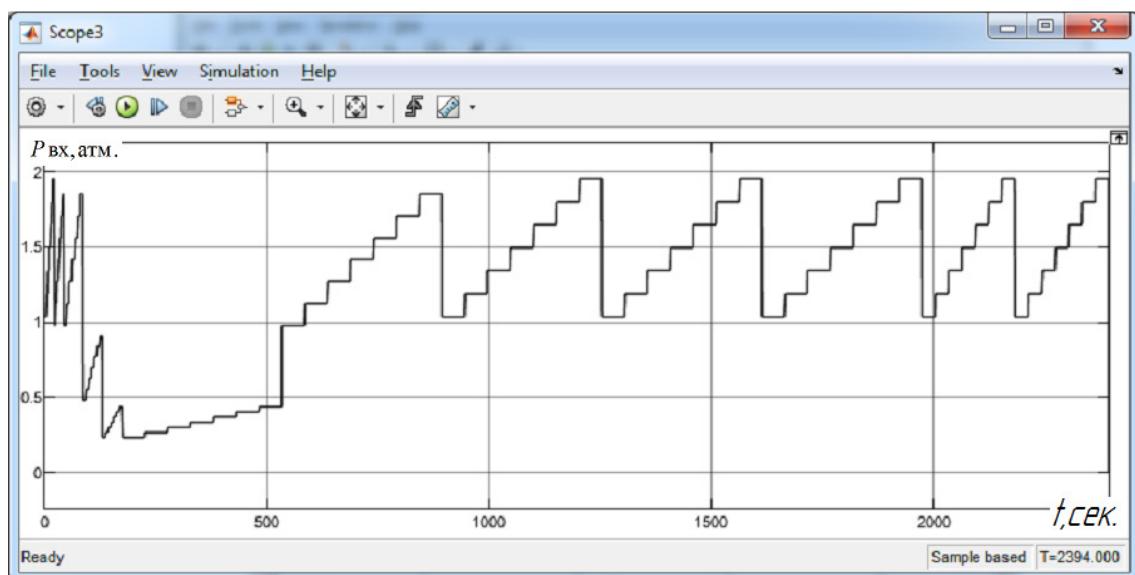


Рис. 3.34. Осциллограмма изменения внешнего давления на основных режимах полета

Результаты эксперимента с моделью (рис.3.1) на режимах «минимизация» и «без минимизации» выбросов окислов азота при разбросе давления окружающей среды в диапазоне изменения числа Маха полета от 0 до 1, одновременно с изменением температуры окружающей среды, форма и величина воздействия отражена на рис. 3.35, 3.36.

Моделирование производилось без учета ограничения по высоте полета 914 м. (рис. 3.35).

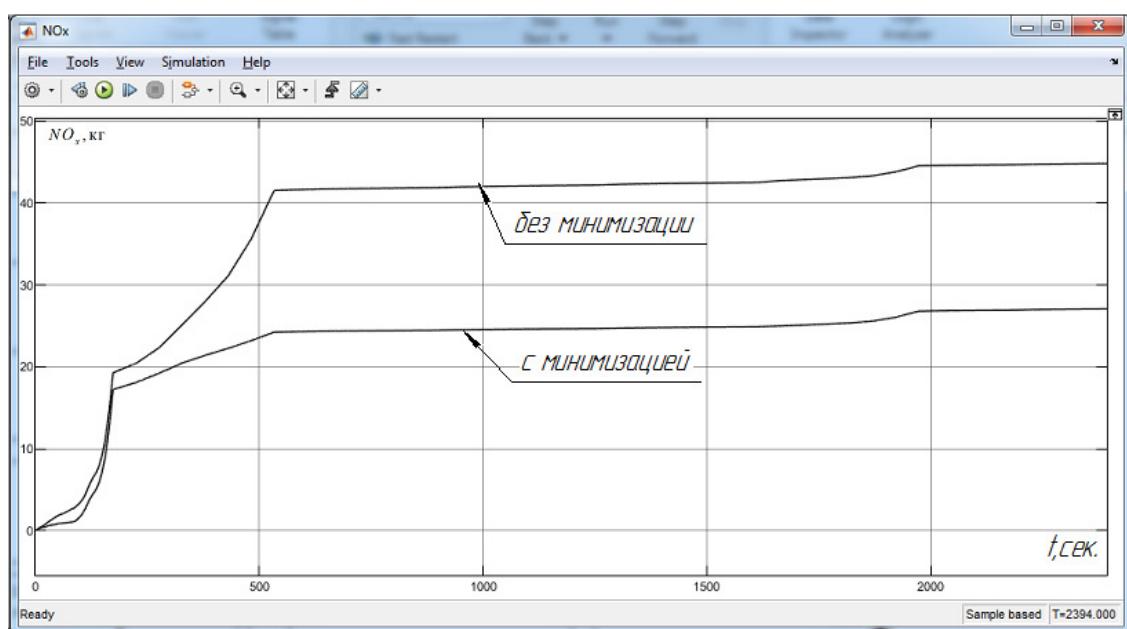


Рис. 3.35. Осциллограмма интегрального показателя окислов азота при наличии возмущающих воздействий без учета ограничения высоты в 914 м.

Как видно из рисунка 3.35 интеграл окислов азота активно растет в начале осуществления полета, то есть на режимах «Взлет», «Набор» (с «минимизацией» от 0 до 24 кг и «без минимизации» от 0 до 42 кг) и его рост замедляется на режимах «Снижение», «Заход на посадку (ПМГ)», «Руление (ЗМГ)» (с «минимизацией» от 24 до 27 кг и «без минимизации» от 42 до 45 кг).

При наличии ограничения по высоте полета и учетом возмущающих воздействий по давлению и температуре осциллограмма представлена на рис 3.36.

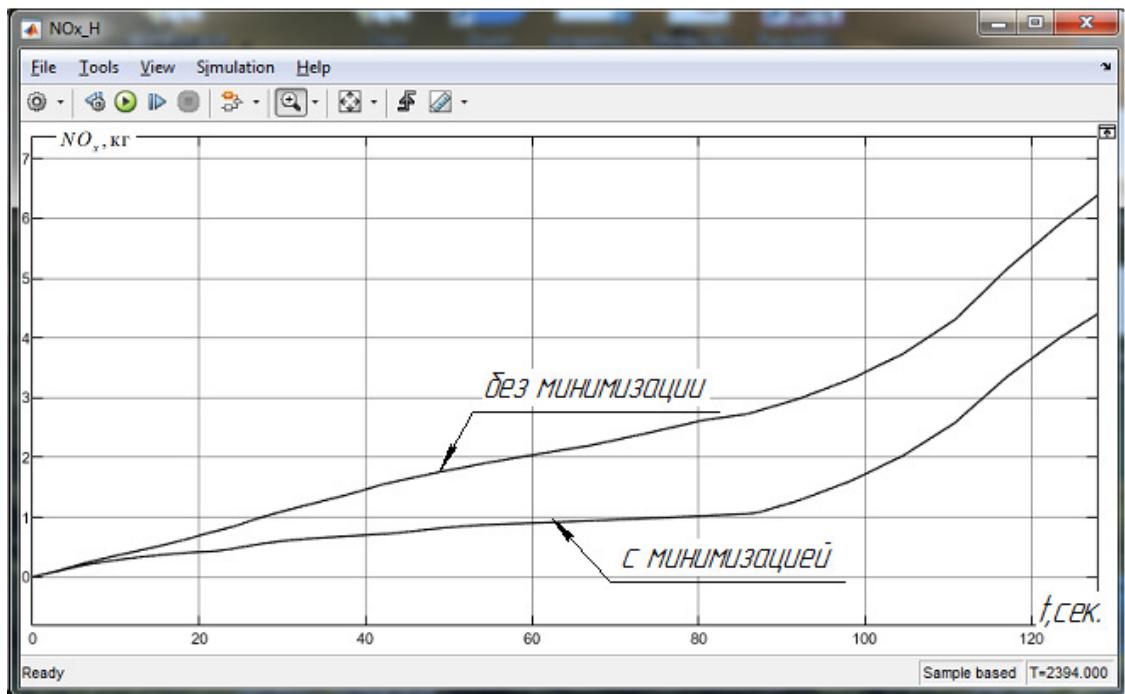


Рис. 3.36. Осциллограмма интегрального показателя окислов азота при наличии возмущающих воздействий с учетом ограничения высоты в 914 м.

Из рисунка 3.36, видно, интегральный показатель эмиссии удовлетворяет требованиям ICAO в 18 кг в обоих случаях как с «минимизацией» показывая выбросы в пределах 4 – 4,5 кг с учетом ограничения высоты в 914 м., так и на режиме «без минимизации» результаты в пределах 6 – 6,5 кг.

3.8.3.1 Результаты моделирования регулятора распределения топлива на режиме «с минимизацией» выбросов окислов азота

Работа регулятора распределения топлива по коллекторам представлена на рисунке 3.37. На дисплее 1 отражено изменение суммарного топлива, поступающее в регулятор выраженное в процентах. Дисплей 2 показывает управляющее воздействие, поступающее на заслонку топлива в

соответствующие коллектора. Дисплей 3 отражает величину расхода топлива в каждом из коллекторов после регулирования

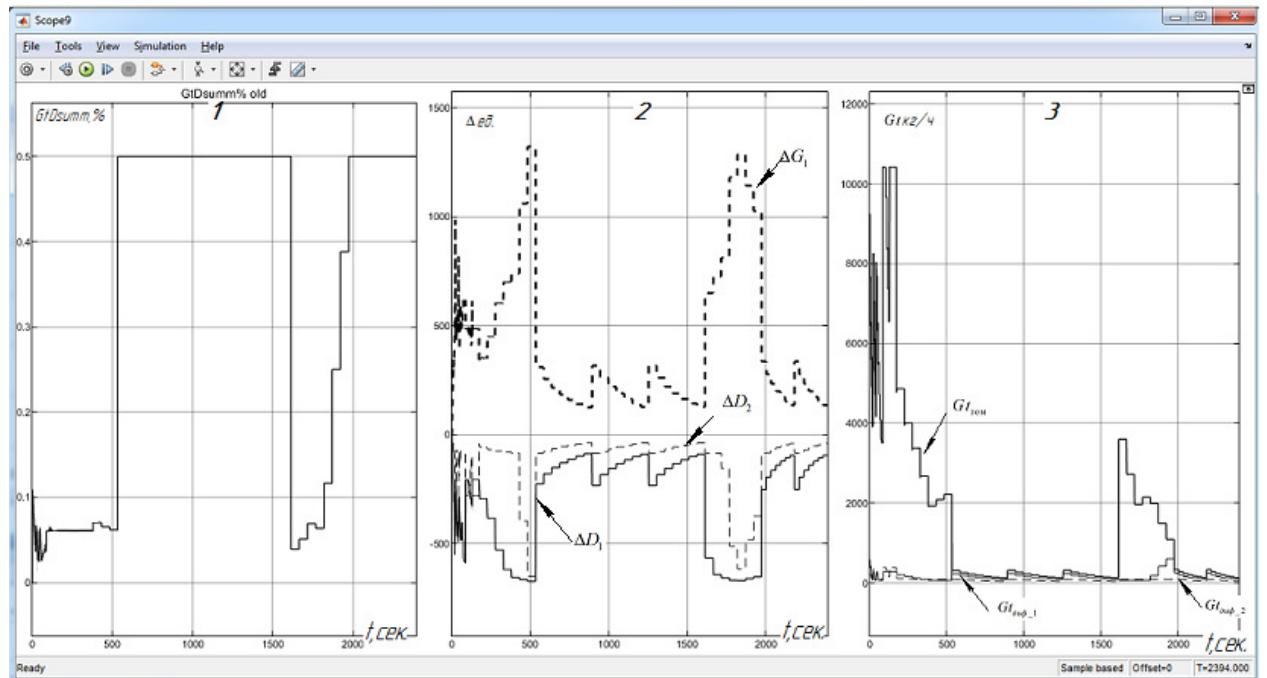


Рис. 3.37. Оциллограмма работы адаптивного ННР распределения топлива по коллекторам
«с минимизацией»

Следует отметить, что разработанная модель управления окислами азота на режиме работы «с минимизацией» подразумевает увеличение подачи топлива в гомогенный коллектор на режимах «Взлет-набор», что отражено на дисплее 2 и 3 рис. 3.37.

Адаптивный ННР обеспечивает устойчивую работу заслонок топлива диффузионных D_1 , D_2 и гомогенного коллекторов G_1 (рис. 3.37, дисплей 2).

Так как в системе не происходит уменьшение расхода топлива в диффузионном факеле ниже 5% на режимах «Взлет-набор», то отсутствуют предпосылки для возникновения режима «виброгорения» (рис. 3.37, дисплей 1).

Поскольку коэффициент избытка воздуха в соответствии с рис. 3.31 (п. 3.5.1) возрастает на режимах «Взлет-набор» с «минимизацией» и «без минимизации» окислов азота, следует оценить возможность возникновения

режимов «бедного» срыва, «частичного бедного» срыва и «виброгорения». Результаты моделирования на динамической модели представлены на рис. 3.38.

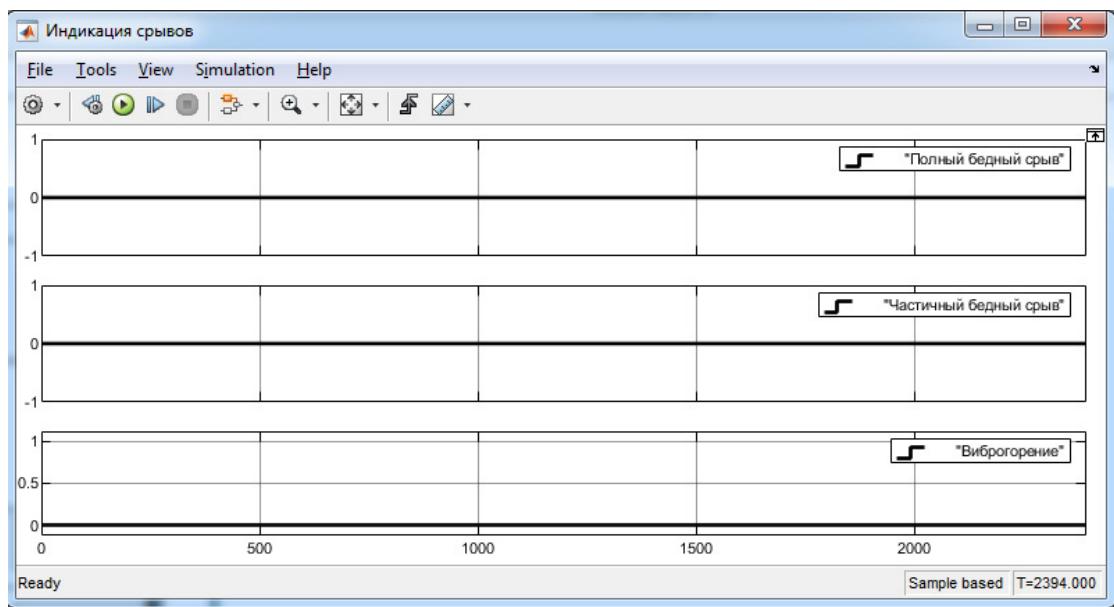


Рис. 3.38. Осциллограмма отсутствия индикации срывов пламени в камере сгорания

Отсутствие срывов объясняется тем, что регулирование происходит строго в «зоне регулирования*».

Рассмотрим моделирование на режиме «без минимизации» выбросов окислов азота.

3.8.3.2 Результаты моделирования регулятора распределения топлива на режиме «без минимизации» выбросов окислов азота

На рисунке (рис. 3.39) представлены результаты работы регулятора на режиме «без минимизации» выбросов окислов азота с учетом влияния изменения температуры и давления на входе в двигатель (атмосферного давления). Аналогично см. п. 3.8.3.1. на дисплее 1 отражено изменение суммарного топлива, поступающее в регулятор выраженное в процентах. Дисплей 2 показывает управляющее воздействие, поступающее на заслонку

топлива в соответствующие коллектора. Дисплей 3 отражает величину расхода топлива в каждом из коллекторов после регулирования

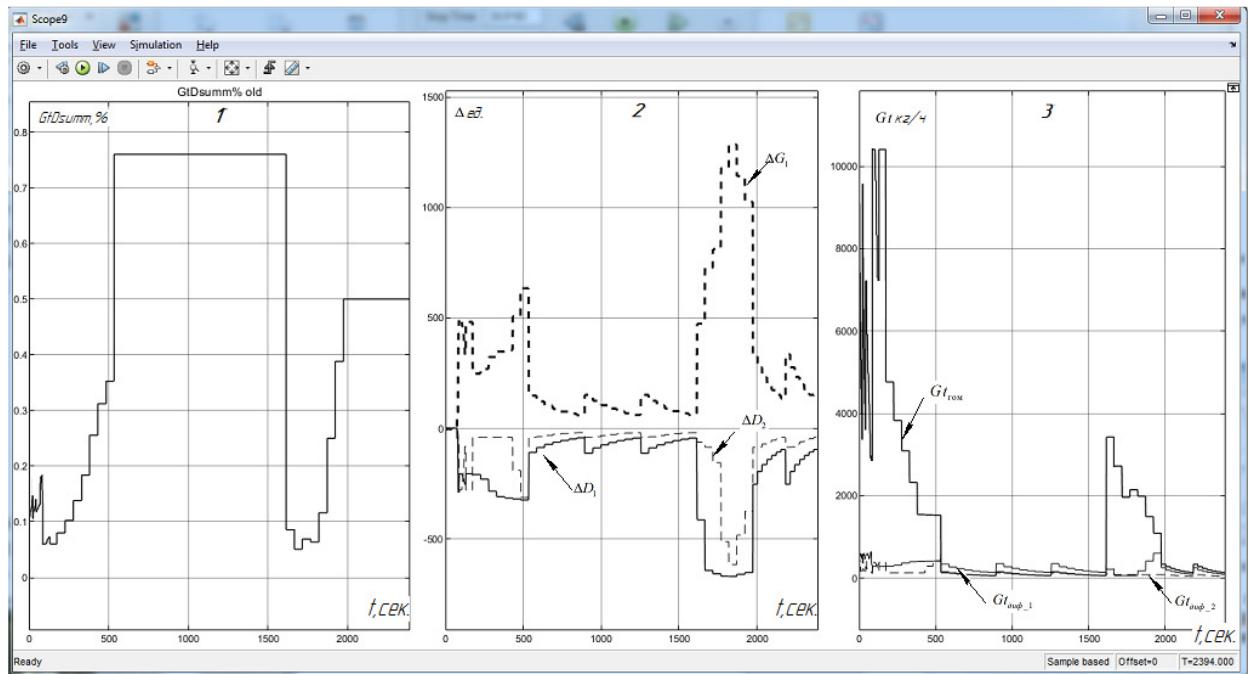


Рис. 3.39. Осциллограмма работы адаптивного ННР распределения топлива по коллекторам «без минимизации»

Следует отметить, что разработанная модель управления окислами азота на режиме работы «без минимизации» не подразумевает увеличение подачи топлива в гомогенный коллектор на режимах «Взлет-набор», что отражено на дисплее 1 и 3 рис. 3.39.

Адаптивный ННР обеспечивает устойчивую работу заслонок топлива диффузионных D_1, D_2 и гомогенного коллекторов G_1 (рис. 3.39, дисплей 2).

Так как в системе не происходит уменьшение расхода топлива в диффузионном факеле ниже 5% на режимах «Взлет-набор», то существуют предпосылки для возникновения режима «виброгорения» (рис. 3.39, дисплей 1).

На рис. 3.40 отражены основные параметры двигателя: a_{ks} (ед.) – изменение коэффициента избытка воздуха; Gt_{sum} (кг/ч) – изменение суммарного

расхода топлива в двигатель; T_k (K) – изменение температуры на корпусе камеры сгорания; $n_{\text{вд}}$ (об/мин) – обороты вентилятора двигателя.

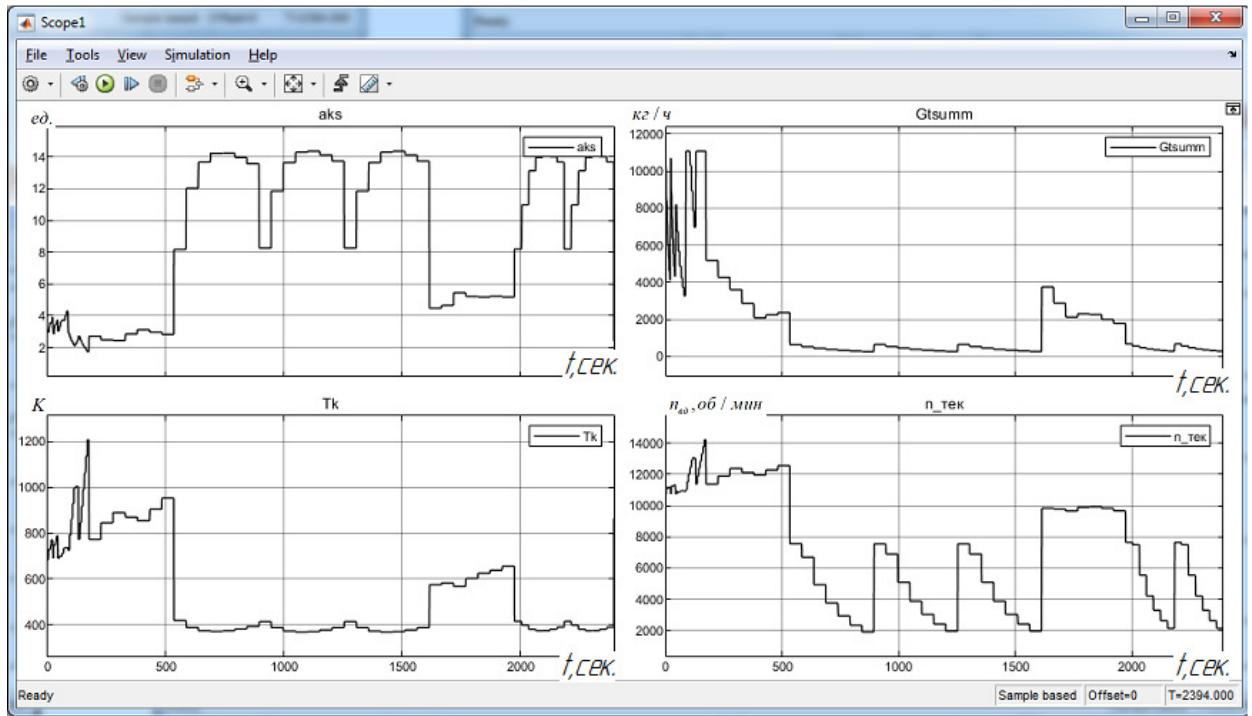


Рис. 3.40. Осциллограмма работы основных параметров двигателя с адаптивным ННР

Из рис. 3.40 видно устойчивую работу двигателя по оборотам $n_{\text{вд}}$ при значительном разбросе атмосферного давления и температуры окружающей среды.

3.9 ВЫВОДЫ ПО ТРЕТЬЕЙ ГЛАВЕ

По результатам эксперимента установлено, что регулятор NO_x и измерители на нечеткой логике, которые выступают в качестве измерителя фактического значения NO_x , отрабатывают весь диапазон воздействий по температуре и давлению (атмосферным).

По результатам эксперимента установлено что исходная модель без учета высотно климатических условий дает следующие результаты:

На режиме «с минимизацией» интегральный показатель эмиссии окислов азота NO_x не превышает 18 кг (фактическое значение 10 кг) на высоте полета до

914 м. при среднестатистическом времени полета. На режиме «без минимизации» значения выбросов достигают 18 кг.

С учетом влияния температуры и давления окружающей среды, получены следующие результаты:

Обеспечен требуемый результат работы регулятора перераспределения топлива по коллекторам, который обеспечивает интегральный показатель значения эмиссии требованиям *ICAO* в 18 кг в обоих случаях как с «минимизацией» показывая выбросы в пределах 4 – 4,5 кг с учетом ограничения высоты в 914 м., так и на режиме «без минимизации» результаты в пределах 6 – 6,5 кг.

На режиме без учета ограничения высоты в 914 м. интегральный показатель окислов азота активно растет в начале осуществления полета, то есть на режимах «Взлет», «Набор» (с «минимизацией» от 0 до 24 кг и «без минимизации» от 0 до 42 кг) и его рост замедляется на режимах «Снижение», «Заход на посадку (ПМГ)», «Руление (ЗМГ)» (с «минимизацией» от 24 до 27 кг и «без минимизации» от 42 до 45 кг).

Поскольку параметры двигателя находятся строго в «зоне регулирования*», то не происходит срывов пламени в камере сгорания.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Клячкин, А.Л. Теория воздушно-реактивных двигателей. М. Изд-во «Машиностроение», 1969.
2. Шляхтенко, С.М. Теория и расчет воздушно-реактивных двигателей: учебник для вузов. – М.: Машиностроение, 1987. – 568 с.
3. Мильтон, Т.С. Обеспечение экологичности камер сгорания газотурбинных установок, проектируемых на базе авиационных технологий: Дис. ... канд. техн. наук: 05.14.16 / Т.С. Мильтон, – М, 2000. – 88 с.
4. Многофорсуночная камера сгорания – основа технологии обеспечения экологической безопасности авиационных газотурбинных двигателей / Ю. И. Цыбизов, С.В. Лукачев, В.В. Бирюк, А.А. Горшаклев // Проблемы и

перспективы развития двигателестроения: Материалы докладов международной научно-технической конференции, Самара, 22–24 июня 2016 года. – Самара: Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королёва, 2016. – С. 220-221.

5. Ткаченко, Д.П. Экспериментальные исследования эмиссии NO_x комбинированного фронтового устройства для перспективной камеры сгорания ВРД: Дис. ... канд. техн. наук: 05.07.05 / Д.П. Ткаченко, – М, 2006. – 127 с.
6. Приложение 16 к Конвенции о международной гражданской авиации. Охрана окружающей среды. Том II. Эмиссия авиационных двигателей: дата введения 8 марта 2008 г. / Международная организация гражданской авиации. – Изд. официальное. – ИКАО, 2008. – 118 с. : ISBN 978-92-9231-130-8.
7. Практическая аэrodинамика маневренных самолетов: Учебник для летного состава / В.А. Алтухов, В.Г. Брага, Г.Ф. Бутенко [и др.] ; Под общ. ред. Н.М. Лысенко. – Москва : Воениздат, 1977. - 439 с.
8. Голубев, В.А. Двухконтурные авиационные двигатели: Теория, расчет и характеристики : учебное пособие для вузов. Москва : Изд-во МАИ, 1993. 166 с.
9. Терещенко, М.А. Моделирование нестационарных процессов в аппаратах пульсирующего горения и исследование их влияния на экологические характеристики: Дис. ... канд. техн. наук: 01.04.14 / М.А. Терещенко, – Воронеж. 2008. – 121 с.
10. Комаров, Е.М. Методы уменьшения эмиссии вредных веществ в камерах сгорания ГТД и ГТУ / Е. М. Комаров // Машиностроение и компьютерные технологии. – 2018. – № 5. – С. 9-29.
11. Смышляев, А.О. Исследование содержания вредных выбросов газотурбинных установок / А. О. Смышляев, Н. А. Кутлин, А. М. Гильмутдинов // Научный журнал. – 2019. – № 6(40). – С. 31-32
12. Мухина, И.В. Разрушение озонового слоя / И. В. Мухина, Т. А. Бородкина // Территория науки. – 2014. – № 1. – С. 107-109.

13. Скрябин, М.Л. Образование топливных оксидов азота в процессе горения углеводородного топлива / М. Л. Скрябин. — Текст : непосредственный // Молодой ученый. — 2015. — № 14 (94). — С. 186-188.
14. Гаджиев, О.Б. Механизм термического окисления оксида азота (II) в газовой фазе : специальность 02.00.04 "Физическая химия" : диссертация на соискание ученой степени кандидата химических наук / Гаджиев Олег Боярович. – Нижний Новгород, 2011. – 174 с.
15. Коробейников, О.П. О применимости теории Зельдовича цепного распространения пламени для горения водородокислородных смесей / О. П. Коробейников, Т. А. Болькова // Физика горения и взрыва. – 2009. – Т. 45. – № 5. – С. 3-7.
16. Рассохин, В. А. Машиностроение. Турбинные установки. Т. IV-19 / В. А. Рассохин, Л. А. Хоменок, В. Б. Михайлов и др. ; под ред. Ю. С. Васильева - Москва : Машиностроение, 2015. - 1030 с. - ISBN 978-5-94275-696-3. - Текст : электронный // ЭБС "Консультант студента" : [сайт]. - URL : <https://www.studentlibrary.ru/book/ISBN9785942756963.html> (дата обращения: 06.05.2022).
17. Дьяченко, Д.А. Повышение надежности и обеспечение требуемого уровня дымления камеры сгорания ТРДДФ: Дис. ... канд. техн. наук: 05.07.05 / Д.А. Дьяченко, – М, 2009. – 141 с.
18. Лопанов, А. Н., Хомченко, Ю.В. Теория горения и взрыва: методические указания к выполнению лабораторных работ / А.Н. Лопанов, Ю.В. Хомченко. – Белгород: Изд-во БГТУ, 2010. – 46 с.
19. Лефер, А. Процессы в камерах сгорания ГТД : Перевод с английского канд. техн. наук С. О. Апельбаума, А. А. Горбатко, А. Д. Рекина, В. И. Ягодкина под редакцией д-ра техн. наук, проф. В. Е. Дорошенко Москва «МИР» 1986. ББК 39.55 Л 53 УДК 621.452.3 Лефевр А. Процессы в камерах сгорания ГТД: Пер. с англ. – М.: Мир, 1986. – 566 с.

20. Нугуманов, А. Д. Использование мирового опыта регулирования газотурбинных двигателей (ГТД) с малоэмиссионной камерой сгорания (МЭКС) по режимам мощности и в климатическом диапазоне при создании МЭКС для ГТД разработки АО "ОДК-Авиадвигатель" / А. Д. Нугуманов, А. М. Сипатов, В. А. Назукин // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Аэрокосмическая техника. – 2017. – № 50. – С. 139-147. – DOI 10.15593/2224-9982/2017.50.13.
21. DOC 9889. Руководство по качеству воздуха в аэропортах: дата введения 18 сент. 2020 г. / Международная организация гражданской авиации. – Изд. официальное. – ИКАО, 2020. – 236 с.: ISBN 978-92-9265-300-2.
22. Сравнение методов расчета эмиссии авиационных двигателей / Н. В. Никитевич, А. А. Калашников, А. М. Турчанов [и др.] // Актуальные проблемы авиации и космонавтики. – 2015. – Т. 1. – № 11. – С. 751-753.
23. Основные процессы и аппараты химической технологии : Пособие по проектированию / Г. Борисов, В. П. Брыков, Ю. И. Дытнерский [и др.]. – 2-е издание, переработанное и дополненное. – Москва : Издательство Химия, 1991. – 496 с. – ISBN 5-7245-0133-3.
24. Физические основы ультразвуковой технологии / В. Ф. Казанцев, А. М. Мицкевич, Б. А. Агранат [и др.]. – 1970. – 689 с.
25. Мингазов, Б. Г. Исследование эмиссии токсичных веществ при впрыске воды в камеру сгорания / Б. Г. Мингазов, Т. Х. Мухаметгалиев // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета им. академика С.П. Королёва (национального исследовательского университета). – 2011. – № 5(29). – С. 203-207.
26. Патент России на изобретение № 2 347 143 Система газотурбинного двигателя с рекуперацией и способ с применением каталитического горения / А.А. Белокон, Д.Л. Тачтон. : Заявл. 2006106186/06, 23.07.2004 : Дата подачи заявки: 23.07.2004 : Опубликовано: 20.02.2009.

27. Пчелкин, Ю.М. Камеры сгорания газотурбинных двигателей : Учеб. для машиностроит. специальностей вузов / Ю.М. Пчелкин. – Москва: Машиностроение, 1973. – 392 с.
28. Гураков, Н.И. Гибридная методика определения характеристик распыла жидкого топлива центробежными форсунками камер сгорания авиационных ГТД: Дис. ... канд. техн. наук: 05.07.05 / Н.И. Гураков, – Самара, 2021. – 157 с.
29. Быстрые методы определения вредных веществ в воздухе : Текст непосредственный / Е. А. Перегуд, М. С. Быховская, Е. В. Гернет. – 2-е изд., доп. и испр. – Москва : Химия, 1970. – 358 с.
30. Анализ объектов окружающей среды : учеб.-метод. пособие / Ю. С. Петрова, Л. К. Неудачина, Е. Л. Лебедева ; [под общ. ред. Е. Л. Лебедевой] ; М-во науки и высш. образования Рос. Федерации, Урал. федер. ун-т. – Екатеринбург : Изд-во Урал. ун-та, 2019. – 244 с.
31. Михайлова, Т.С. Разработка низкотемпературного сенсора газа, селективного по отношению к диоксиду азота / Т.С. Михайлова, Т.Н. Мясоедова // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2015. – № 8(169). – С. 193-202.
32. Галлямов, А. К. Электрохимический газоанализатор / А. К. Галлямов, Р. Р. Сафин // Научные исследования в области технических и технологических систем : сборник статей Международной научно-практической конференции, Казань, 15 января 2018 года. – Казань: Общество с ограниченной ответственностью "Аэтерна", 2018. – С. 67-70.
33. ГОСТ Р ИСО 10849-2006. Выбросы стационарных источников. Определение массовой концентрации оксидов азота. Характеристики автоматических измерительных систем в условиях применения : Текст непосредственный; Введ. с 08.01.2006. – Москва: Стандартинформ, 2006. – с. 19.
34. Патент № 2559824 С2 Российская Федерация, МПК H01J 37/00. Фотоионизационный газоанализатор : № 2013151308/07 : заявл. 19.11.2013 :

- опубл. 10.08.2015 / В. Л. Будович, Д. В. Будович, Е. Б. Полотнюк [и др.] ; заявитель Общество с ограниченной ответственностью "Бюро аналитического приборостроения "Хромдэт-Экология".
35. Лепявко, А. П. Методы и средства газового анализа : Конспект лекций / А. П. Лепявко. – Москва : Академия стандартизации, метрологии и сертификации, 2016. – 64 с.
36. Патент № 2655728 С1 Российская Федерация, МПК G01N 15/02. Устройство определения параметров взвешенных частиц : № 2017107615 : заявл. 03.07.2017 : опубл. 29.05.2018 / В. В. Семенов ; заявитель федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Донской государственный технический университет».
37. Другов, Ю. С. Экологическая аналитическая химия / Ю. С. Другов. – Москва: 2000. – 432 с. – ISBN 5-88851-034-3
38. Горюнкова, А. А. Современное состояние и подходы к разработке систем мониторинга загрязнения атмосферы / А. А. Горюнкова // Известия Тульского гос. ун-та. Технические науки. – 2013. – № 11. – С. 251-260.
39. Гатин, В.В. Авиационные правила АП-34. Охрана окружающей среды. / В.В. Гатин // Межгосударственный Авиационный Комитет. – Москва : ОАО «Авиаиздат», 2003. – 102 с.
40. Августинович, В. Г. Разработка нейронных систем мониторинга и управления эмиссией вредных веществ для газотурбинных газоперекачивающих агрегатов и электростанций / В. Г. Августинович, Т. А. Кузнецова, А. Д. Нугуманов // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2019. – Т. 330. – № 8. – С. 7-17. – DOI 10.18799/24131830/2019/8/2207.
41. Титов, Ю.К. Адаптивные нечеткие устройства систем управления с гарантированной устойчивостью: Дис. ... канд. техн. наук: 05.13.05 / Ю.К. Титов, – Пермь, 2019. – 204 с.

42. Кузнецова, Т.А. Вопросы теории и практики разработки робастных систем управления авиационными двигателями на базе встроенных математических моделей: монография / Т.А. Кузнецова, В.Г. Августинович. – Пермь : Изд-во Перм. нац. исслед. политехн. ун-та, 2018. – 266 с.
43. Рейзлин В.И. Численные методы оптимизации: учебное пособие / В.И. Рейзлин; Национальный исследовательский Томский политехнический ун-т. – Томск: Изд-во Национального исследовательского Томского политехнического ун-та, 2013. – 105 с.
44. Шляхтенко С.М. Теория и расчет воздушно-реактивных двигателей: учебник для вузов. – М.: Машиностроение, 1987. – 568 с.
45. Григорьев, Д.Р. Повышение основных теплотехнических характеристик топочного устройства с вихревыми горелками путем формирования вертикального вращающегося потока продуктов горения: Дис. ... канд. техн. наук: 05.04.01 / Д.Р. Григорьев, – Новочеркасск, 2000. – 141 с.
46. Тринченко, А. А. Снижение выбросов оксидов азота при ступенчатом сжигании топлива / А. А. Тринченко // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. – 2011. – № 2(123). – С. 104-109.
47. Августинович В.Г., Кузнецова Т.А. Повышение надежности систем автоматического управления газотурбинными двигателями с применением алгоритмических методов // Изв. Томского политехнического университета, Т.326, №9, 2015. – С.68–77
48. Исследование нечетких регуляторов / Т. С. Леготкина, Ю. Н. Хижняков, В. С. Мальков, Д. А. Шестаков // Научные исследования и инновации. – 2012. – Т. 6. – № 1-4. – С. 122-128.
49. Исследование нейронного регулятора / Т. С. Леготкина, Ю. Н. Хижняков, В. С. Мальков, Д. А. Шестаков // Научные исследования и инновации. – 2012. – Т. 6. – № 1-4. – С. 129-134.

50. Кузнецова, Т. А. Применение технологий искусственного интеллекта для управления малоэмиссионной камерой сгорания авиационного двигателя / Т. А. Кузнецова, В. Г. Августинович // Информационно-измерительные и управляющие системы. – 2017. – Т. 15. – № 9. – С. 18-28.
51. Коровин, А.М. Интеллектуальные системы: текст лекций / А.М. Коровин. – Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2015. – 60 с.
52. Воронов, И. В. Обзор типов искусственных нейронных сетей и методов их обучения / И. В. Воронов, Е. А. Политов, В. М. Ефременко // Вестник Кузбасского государственного технического университета. – 2007. – № 3(61). – С. 38-42.
53. Рутковская, Д. Нейронные сети, генетические алгоритмы и нечеткие системы / Д. Рутковская, М. Пилиньский, Л. Рутковский. – Москва : Горячая линия–Телеком, 2013. – 384 с. – ISBN 978-5-9912-0320-3.
54. Хижняков, Ю.Н. Алгоритмы нечеткого, нейронного и нейро-нечеткого управления в системах реального времени: учеб. пособие. Пермь: Изд-во Перм. нац. исслед. политехн. ун-та, 2013. – 160 с.
55. Хижняков Ю.Н. Нечеткое, нейронное и гибридное управление: учеб. пособие / Ю.Н. Хижняков. – Пермь: Изд-во Перм. нац. исслед. политехн. ун-та, 2013. – 303 с.