

УДК: 629.7.022

Методика весовых расчетов узлов и агрегатов самолета с применением искусственной нейронной сети

О.В. Абашев

Аннотация

Проведение весовых расчетов является одной из важнейших задач проектирования самолета. Повышение точности расчетов, возможность использования единой методики при определении массы различных узлов и агрегатов, снижение временных и финансовых затрат формируют новые требования к методическому и программному обеспечению весового проектирования.

В работе рассматривается методика расчета массы узлов и агрегатов самолета с использованием математического аппарата искусственных нейронных сетей. Приводятся результаты проектных исследований.

Ключевые слова

проектирование самолетов; весовое проектирование; методика расчетов; искусственные нейронные сети; искусственный интеллект

Расчет массы самолета, его узлов и агрегатов является сложной задачей, решение которой требуется на различных этапах разработки. Сложность проблемы формирования единой методики весовых расчетов определяется многообразием типов летательных аппаратов, конструктивно-силовых схем, технических решений и т.д. На точность и достоверность результатов анализа также сильно влияет выбор параметров однозначно описывающих элемент конструкции ЛА. Особенно критичным становится выбор параметров весовой математической модели на этапе предварительного проектирования, когда высока степень неопределенности не только числового диапазона выбранных характеристик, но и степень их влияния на модель в целом. Существующие методы расчета массы конструкции самолета зависят от целевого назначения самолета и рассматриваемого агрегата [1-4]. Такой подход при использовании известных весовых формул (в основном имеющих эмпирический

характер) для расчета элементов конструкции планера современного самолета может привести к большим ошибкам.

Решение проблем, связанных с расчетом массы конструкции летательного аппарата, следует искать на новом методологическом уровне. Существующие противоречия между повышением качества проектных работ, сокращением сроков проектирования и снижением материальных затрат приводят к необходимости поиска новых методов и средств весового анализа. Принципиально новые подходы требуют разработки нового класса программных продуктов, позволяющих инженеру-проектировщику или расчетчику в минимальные сроки рассмотреть множество альтернативных конструктивно-параметрических решений и оценить их влияние на весовые характеристики создаваемого самолета.

Сложность создания универсальной методики расчета массы самолета и его агрегатов можно объяснить:

- 1) наличием большого числа параметров, которые изменяются в ходе проектирования;
- 2) трудностью или невозможностью математического описания неформализуемых параметров (технологии производства, особенностей эксплуатации и пр.);
- 3) небольшой номенклатурой самолетов-прототипов (единицы или десятки);
- 4) при появлении новых материалов, технических решений и т.д. традиционные методики требуют глубокой переработки и уточнения, а в них отсутствует элемент прогнозирования.

Основное уравнение, определяющее баланс масс самолета [1, 2], в безразмерном виде записывается как

$$\bar{m}_{кон} + \bar{m}_{с.у} + \bar{m}_{об.упр} + \bar{m}_m + \frac{m_{ц.н} + m_{сл}}{m_0} = 1, \quad (1)$$

где $\bar{m}_{кон}$, $\bar{m}_{с.у}$, \bar{m}_m , $\bar{m}_{об.упр}$ – относительные массы конструкции, силовой установки, топлива, оборудования и управления.

В свою очередь масса конструкции $\bar{m}_{кон} = m_{кон}/m_0$ состоит из масс агрегатов.

$$\bar{m}_{кон} = \bar{m}_{кр} + \bar{m}_{ф} + \bar{m}_{оп} + \bar{m}_{ш}, \quad (2)$$

где $\bar{m}_{кр}$, $\bar{m}_{ф}$, $\bar{m}_{оп}$, $\bar{m}_{ш}$ – относительные массы крыла, фюзеляжа, оперения и шасси.

В свою очередь каждую составляющую в (2) можно представить, как функцию нескольких переменных, например:

$$\bar{m}_{кр} = f(\mathbf{P}), \quad (3)$$

где $\mathbf{P} = (p_1, p_2, \dots, p_i)$ – набор параметров, описывающих рассматриваемый агрегат.

Таким образом, задачу определения массы конструкции узла, агрегата или самолета можно поставить, как задачу аппроксимации функции многих переменных при заданных ограничениях на пространстве примеров обучающей выборки. Для этого рационально использовать математический аппарат искусственных нейронных сетей (ИНС). Тогда формулу (3) можно представить в виде:

$$\begin{aligned} \bar{m}_{кр} = F(O(X, Y), A(f_{акт}), T(N_{сл}, N_{нейр}^{сл})) \\ \delta \leq \varepsilon \end{aligned}, \quad (4)$$

где $O(X, Y)$ – обучающая выборка, характеризующая область применения нейронной сети;

$A(f_{акт})$ – аналитические параметры нейронной сети и $f_{акт}$ – функция активации;

$T(N_{сл}, N_{нейр}^{сл})$ – топологические параметры искусственной нейронной сети;

$N_{сл}, N_{нейр}^{сл}$ – число слоев в сети и количество нейронов на каждом слое;

δ – ошибка обученной нейронной сети при предъявлении ей тестовых примеров;

ε – заданная малая величина.

Методика расчета массы узлов и агрегатов самолета с использованием нейронных сетей содержит следующие этапы:

- анализ узла/агрегата и выявление параметров, наиболее полно описывающих элемент конструкции;
- декомпозицию сложной конструкции и представление ее совокупностью модельных конструкций, однозначно описанных выбранными параметрами;
- формирование обучающей выборки, которая содержит статистические, эмпирические данные о рассматриваемом классе конструкций;
- выбор топологических и аналитических параметров нейронной сети, рекомендованных для данного типа конструкций;
- проведение процедуры обучения искусственной нейронной сети с заданными параметрами на примерах обучающей выборки;
- проведение параметрических исследований узла/агрегата с помощью обученной нейронной сети, анализ результатов и выбор оптимальных параметров.

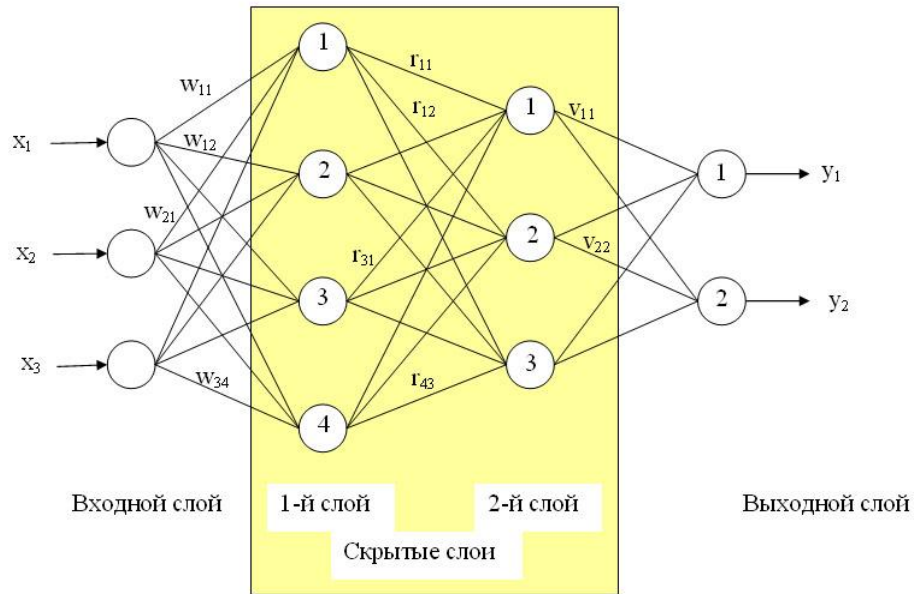


Рисунок 1 – Искусственная нейронная сеть

Рассмотрим процедуру весового расчета на примере крыла магистрального самолета [6]. При концептуальной проработке конструкции летательного аппарата, на этапе предварительного проектирования существует неопределенность в выборе значений тех или иных параметров, схемных решениях и т.д. Поэтому рационально построить массовую модель крыла, как функцию основных характеристик самолета (взлетной массы m_0 и удельной нагрузки на крыло p_0) и безразмерных геометрических параметров крыла (удлинения λ , угла стреловидности χ и сужения η). По аналогии с традиционными оценочными формулами расчета массы крыла в этой зависимости не учитывается число и месторасположение двигателей и основных стоек шасси, тип механизации и т.д. Считается, что учет данных параметров осуществляется в процессе обучения искусственной нейронной сети вследствие предъявления статистических данных.

Входной вектор X искусственной нейронной сети содержит пять параметров, описывающих крыло самолета.

$$X^T = [m_0, p_0, \lambda, \chi, \eta] \quad (5)$$

Выход Y является скаляром – это относительная масса крыла пассажирского самолета.

$$Y = [\bar{m}_{кр}] \quad (6)$$

Таким образом, многослойная ИНС, предназначенная для определения относительной массы крыла на этапе предварительного проектирования, содержит пять входов и один выход.

Обучающая выборка содержит два типа данных – входной вектор, параметры которого соответствуют входам нейронной сети, и эталонный ответ или целевое значение. Эталонные ответы формируются по статистическим данным об относительной массе крыла пассажирского самолета. Обученная искусственная нейронная сеть аппроксимирует функцию $\overline{m}_{кр} = f(m_0, p_0, \lambda, \chi, \eta)$ на пространстве обучающей выборки. Обучающая выборка представляет собой совокупность входных данных \mathbf{X} и соответствующий им набор ответов \mathbf{D} .

$$\mathbf{X} = (X_1, X_2, \dots, X_S),$$

где \mathbf{X} – набор входных векторов выборки P_M ;

$$X_i^T = (m_0^{(i)}, p_0^{(i)}, \lambda^{(i)}, \chi^{(i)}, \eta^{(i)}) – \text{вектор входных параметров выборки } P_M, i = \overline{1, S};$$

T – знак транспонирования;

S – число обучающих примеров, составляющих выборку P_M .

$$\mathbf{D} = (d_1, d_2, \dots, d_S),$$

\mathbf{D} – набор эталонных ответов выборки P_M , соответствующий набору параметров X_i .

При обучении нейронной сети определяются весовые коэффициенты, при которых сеть способна решить поставленную задачу. Режимы работы ИНС представлены на рис. 2. В ходе прямого расчета (информация распространяется только от входов к выходам) нейронная сеть, используя уже вычисленные весовые коэффициенты, обрабатывает представленный исходный вектор и выдает ответ.

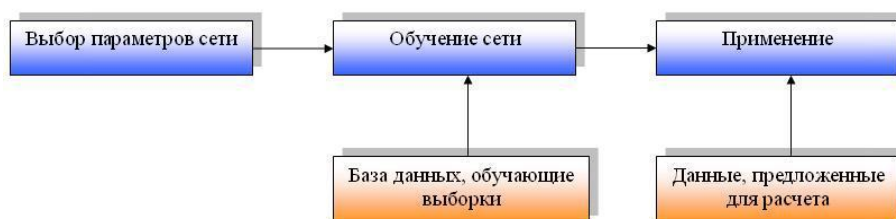


Рисунок 2 – Этапы функционирования ИНС

Многослойную искусственную нейронную сеть необходимо описать параметрами – топологическими и аналитическими. Топологическими параметрами являются: количество скрытых слоев нейронной сети и число узлов на них, закон передачи информации между

нейронами. Аналитическими параметрами являются функция активации и метод обучения нейронной сети.

Алгоритм обратного распространения ошибки является градиентным методом обучения многослойной искусственной нейронной сети. Выполняется итерационный пересчет весовых коэффициентов в зависимости от ошибки вычисления. Ошибка, которая возникает при работе нейронной сети, рассматривается, как функция многих переменных (весовых коэффициентов). Такая ошибка называется целевой функцией или функцией ошибки $E(\mathbf{w})$. Целевая функция определяется квадратичной суммой разностей между выходом сети и ожидаемым ответом. Для многослойной искусственной нейронной сети с одним нейроном на выходном слое и одним эталонным примером функция ошибки имеет вид

$$E(\mathbf{w}) = (y - d)^2, \quad (7)$$

где \mathbf{w} – матрица весовых коэффициентов сети;

y – фактический выход сети;

d – эталонное значение аппроксимируемой функции.

Целью обучения является минимизация функции ошибки, возникающей в нейронах выходного слоя. Алгоритм предусматривает дифференцируемость активационной функции в рассматриваемом диапазоне аргументов.

На рис. 3 представлен укрупненный алгоритм обучения методом обратного распространения ошибки.

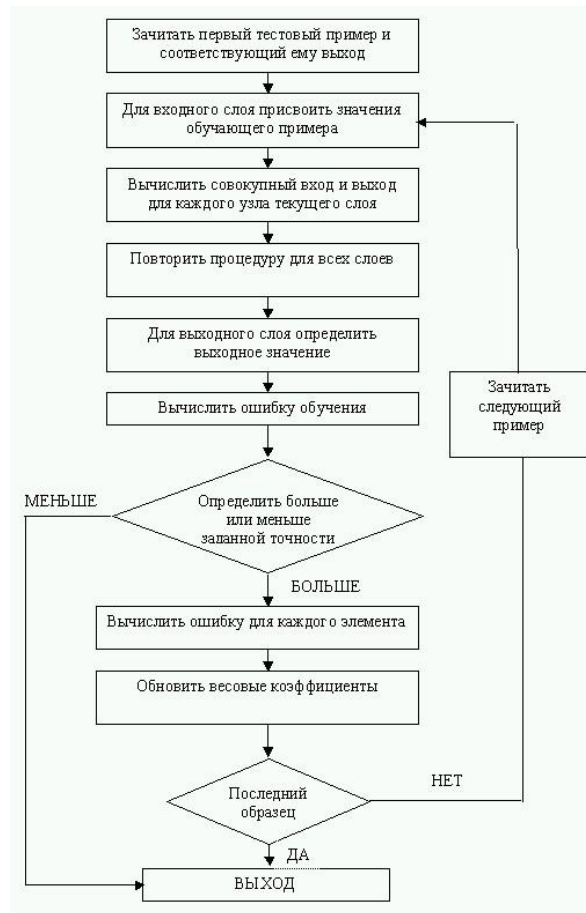


Рисунок 3 – Алгоритм обучения методом обратного распространения ошибки

Если для обучения нейронной сети, предъявить ей S примеров из выбранной обучающей выборки P_M , то целевую функцию ошибки для многослойной искусственной нейронной сети с одним выходом можно записать в виде

$$E(w) = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^S (y_i - d_i)^2, \quad (8)$$

где y_i – значение, вычисленное нейронной сетью при предъявлении на входы вектора X_i из обучающей выборки P_M ;

d_i – эталонный ответ выборки P_M , соответствующий набору параметров X_i ;

S – число примеров из выборки P_M представленных сети для обучения.

Для ускорения процесса сходимости целевую функцию ошибки можно представить в виде [5, 6]

$$E = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^S \left[\tau (y_i - d_i)^2 + (1 - \tau) \Phi(y_i - d_i) \right], \quad (9)$$

где τ – параметр адаптации целевой функции.

Математические весовые модели массы крыла магистрального самолета реализованы с помощью программы NeuroWorks v.2.0.1. Основным назначением программы является проведение расчета относительной массы крыла на ранних этапах проектирования. Система NeuroWorks позволяет:

- сократить время и повысить качество работы проектировщика на этапе предварительного проектирования самолета;
- провести сравнение альтернативных схемных решений;
- проводить подготовку специалистов в высших учебных заведениях.

Разработанная система состоит из четырех модулей:

- базы данных;
- препроцессора;
- многослойной искусственной нейронной сети;
- постпроцессора.

Блок-схема программы представлена на рис. 4.

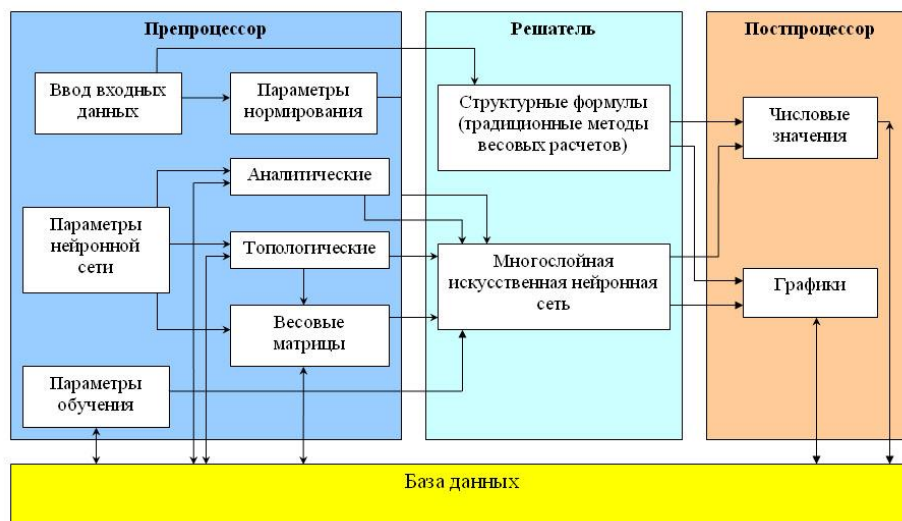


Рисунок 4 – Модули программы NeuroWorks

Система NeuroWorks в базовом варианте рассчитана на пять входных и один выходной параметр. Максимальное число скрытых слоев – 5. На каждом слое пользователь может задать до 100 искусственных нейронов. Максимальная размерность искусственной нейронной сети – 50600 межузловых связей. В качестве активационных в рамках системы могут использоваться следующие функции: гиперболический тангенс, линейная, сигмоидальная, сигмоидальная рациональная, степенная, функция Гаусса, функция Ферми. Эти же функции могут применяться для нормировки параметров. Для обучения искусственной нейронной сети используется алгоритм обратного распространения ошибки, с

расчетом коэффициента скорости обучения на каждом шаге обучения или принимаемым постоянным. Расчет целевой функции ошибки может производиться по следующим стратегиям:

- стандартный;
- ускоренный;
- по абсолютной величине;
- по нормированному значению.

Программа NeuroWorks также позволяет производить расчеты относительной массы крыла магистрального самолета по известным эмпирическим зависимостям отечественных и зарубежных исследователей в области весового проектирования (такие, как формулы Бадягина, Козловского и других). На рис. 5 представлены некоторые рабочие окна интерфейс программы.

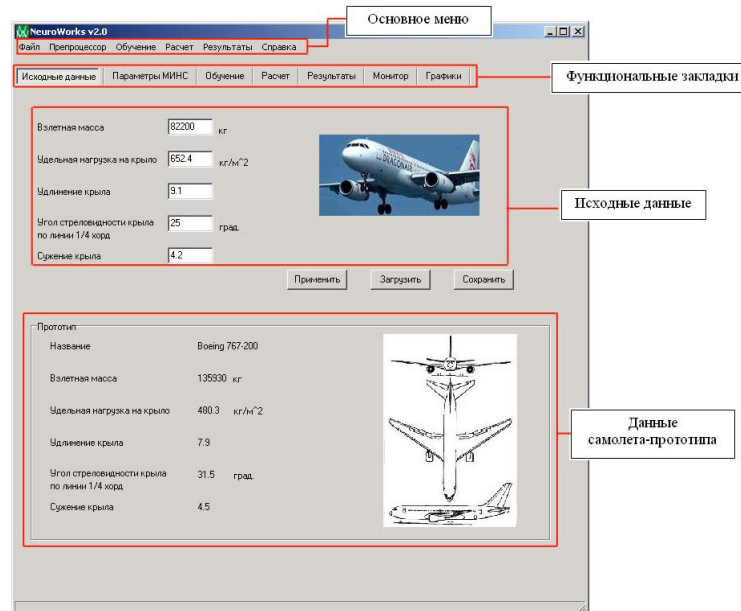


Рисунок 5 – Интерфейс программы NeuroWorks v. v.2.0.1

Проектные исследования, проведенные с помощью программы NeuroWorks, показали возможность ее использования для проведения весовых расчетов. На рис. 6 представлены распределения ошибок вычисления в зависимости от размерности сети.

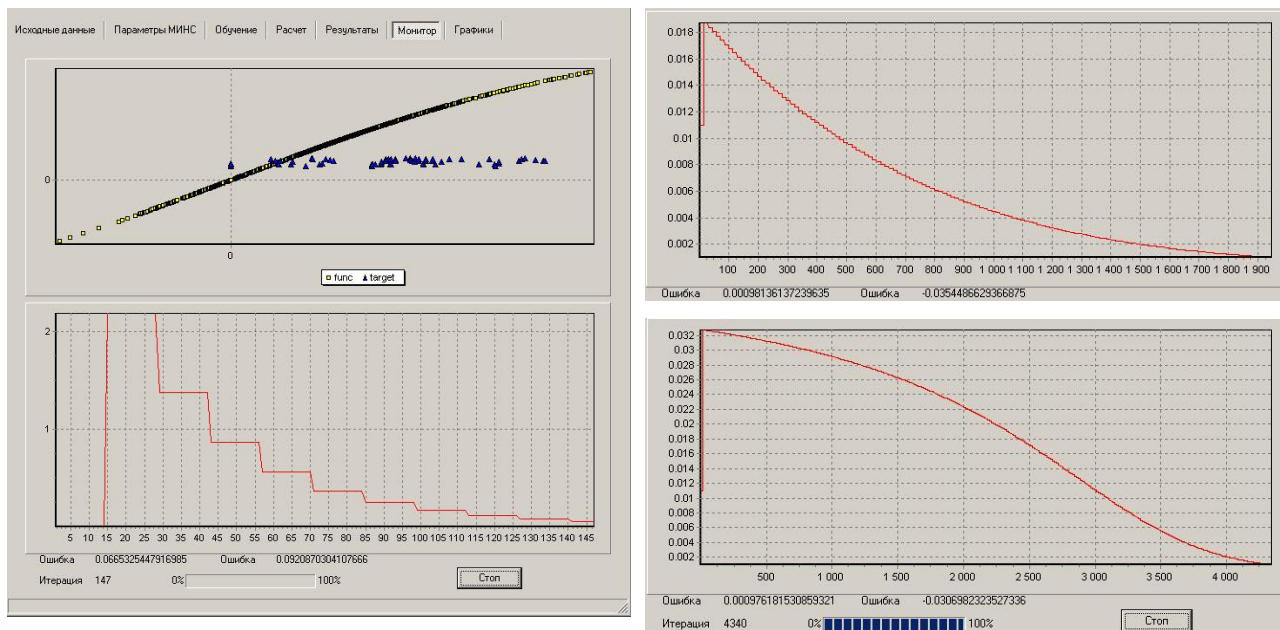
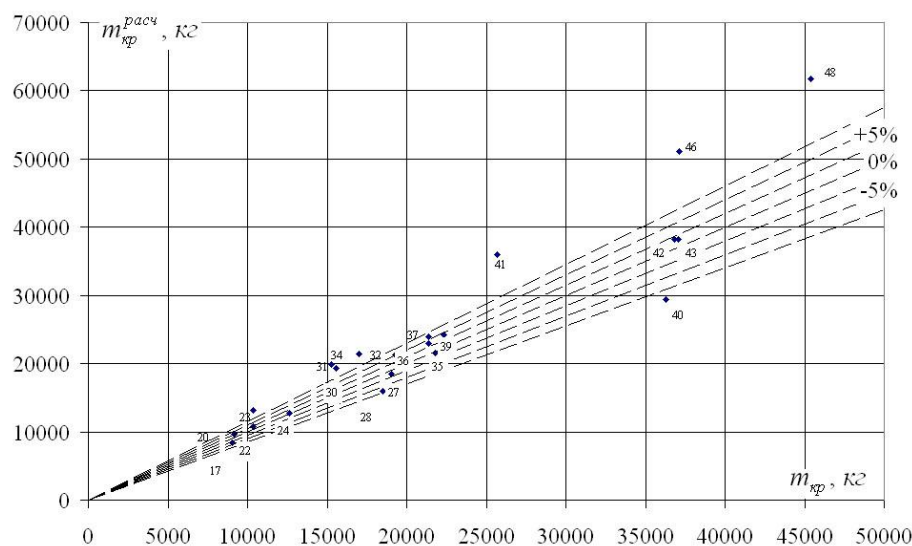
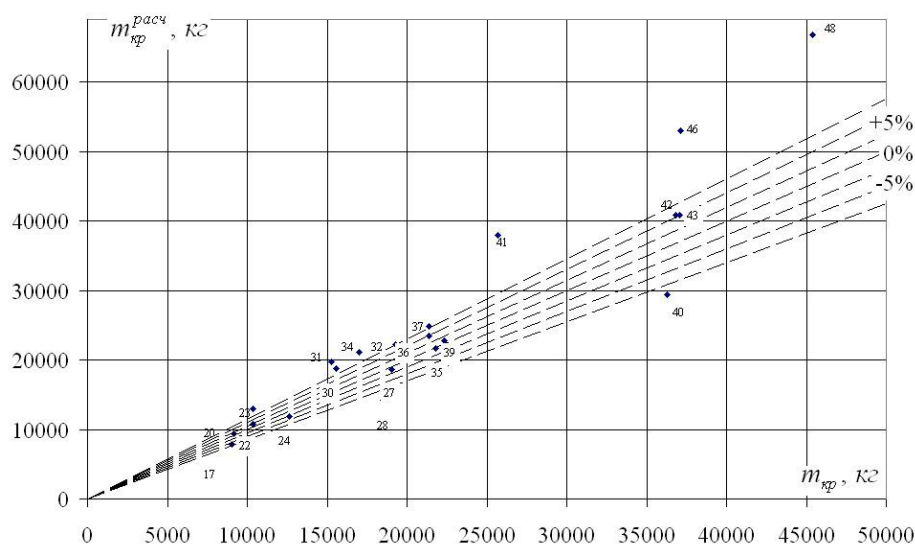


Рисунок 6 – Ошибка расчета относительной массы крыла в зависимости от размерности сети

На рис. 7 представлено сравнение расчетного значения, полученного с помощью обученной нейронной сети вида $5 \times N_1 \times 1$, где $N_1 = 9$ – число нейронов на скрытом слое, с реальной величиной массы крыла. Средняя ошибка по результатам расчета с помощью обученной нейронной сети составляет 2,5% при использовании активационной функции гиперболического тангенса и 5,1% для линейной активационной функции. Использование в нейронных сетях других S-образных функций ошибка составляет величину (7...9)%, завышая реальную массу.



а) сеть $5 \times 9 \times 1$ с активационной функцией гиперболический тангенс



б) сеть $5 \times 9 \times 1$ с линейной активационной функцией

Рисунок 7 – Сравнение расчетной величины и реальной массы крыла

Таким образом, проведенные проектные исследования расчета массы крыла магистрального самолета показали возможность применения методики для всего комплекса весовых расчетов. Использование аппарата искусственных нейронных сетей позволяет производить расчеты массы узлов, агрегатов и систем самолета с заданной точностью.

Библиографический список

1. Шейнин В.М., Козловский В.И. Весовое проектирование и эффективность пассажирских самолетов. Том 1. Весовой расчет самолета и весовое планирование. – М.: Машиностроение, 1977.
2. Шейнин В.М., Козловский В.И. Весовое проектирование и эффективность пассажирских самолетов. Том 2. Расчет центровки и моментов инерции самолета. Весовой анализ. – М.: Машиностроение, 1977.
3. Raymer D.P. Aircraft Design: A Conceptual Approach. AIAA Education Series. 1992, 754 p.
4. Kroes M.J. et al. Aircraft Basic Science. McGraw-Hill Inc. 1993, 414 p.
5. Лю Б. Теория и практика неопределенного программирования. Пер. с англ. – М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2005.
6. Абашев О.В., Куприков М.Ю. Применение искусственных нейронных сетей при проектировании самолетов/ Вестник МАИ. – 2008. – Т.15 №5 – С. 27-33.

Сведения об авторах

Абашев Олег Викторович, научный сотрудник Московского авиационного института
(государственного технического университета);

тел.:+7 499 158-41-98, e-mail: o.abashev@gmail.com