

УДК 681.518.5

DOI: [10.26102/2310-6018/2020.28.1.010](https://doi.org/10.26102/2310-6018/2020.28.1.010)

Система диагностики технического состояния комплекса бортового оборудования воздушного судна на основе интеллектуальных информационных технологий

А.С. Букирёв¹, А.Ю. Савченко², М.И. Яцечко³, В.А. Малышев⁴

¹39 ВП 4 А ВВС и ПВО (г. Джанкой, республика Крым), Российская Федерация.

^{2,3,4}Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина», Воронеж, Российская Федерация.

Резюме: Предложен подход к построению системы диагностики технического состояния комплекса бортового оборудования воздушного судна на основе интеллектуальных информационных технологий с целью обеспечения безопасности полетов. Разработана интеллектуальная диагностическая система и решена задача диагностики технического состояния объектов, выполняющих информационные преобразования сигналов. Обоснована возможность управления избыточностью в комплексе бортового оборудования с помощью интеллектуальной диагностической системы. Принцип построения такой системы реализуется в интересах решения задачи автоматического построения диагностической модели объекта диагностирования за счет применения методов искусственного интеллекта. Это позволяет реализовать в виде программного обеспечения унифицированную (инвариантную к различным объектам) интеллектуальную диагностическую систему в комплексе бортового оборудования, построенном по принципу интегрированной модульной авионики. В свою очередь, важной особенностью реализации и применения интеллектуальной диагностической системы является возможность функционирования (обучения) и выполнения задачи по предназначению (диагностика технического состояния) в режиме реального масштаба времени. Процесс обучения интеллектуальной диагностической системы может осуществляться двумя основными способами: обучение с учителем (является наиболее актуальным в процессе испытания объекта авиационной техники на надежность), а также обучение без учителя (является полностью автономным способом, наиболее актуальным в процессе испытаний объекта контроля или применения по назначению). В процессе испытания объекта контроля на надежность интеллектуальная диагностическая система позволит сформировать интеллектуальную базу данных моделей исходного (правильного) функционирования объекта контроля комплекса бортового оборудования с последующим распознаванием предотказных состояний и их классификацией (кластеризацией).

Ключевые слова: функциональная информационная избыточность, интеллектуальная диагностическая система, комплекс бортового оборудования.

Для цитирования: Букирёв А.С., Савченко А.Ю., Яцечко М.И., Малышев В.А. Система диагностики технического состояния комплекса бортового оборудования воздушного судна на основе интеллектуальных информационных технологий. *Моделирование, оптимизация и информационные технологии*. 2020;8(1). Доступно по: https://moit.vivt.ru/wp-content/uploads/2020/02/BukirevSoavtors_1_20_1.pdf DOI: 10.26102/2310-6018/2020.28.1.010

Diagnostic system for the technical condition of the aircraft avionics complex based on intelligent information technologies

A.S. Bukirev¹, A.Y. Savchenko², M.I. Yatsechko³, V.A. Malyshev⁴

¹39 HR 4 A Air Force and Air Defense (Dzhankoy, Republic of Crimea), Russian Federation.

^{2,3,4}*Military Training and Scientific Center of the Air Force "Air Force Academy named after professor N.E. Zhukovsky and Y.A. Gagarina", Voronezh, Russian Federation*

Abstract: Proposed Approach to the construction of a diagnostic system for the technical condition of the aircraft avionics complex based on intelligent information technologies in order to ensure flight safety is proposed. An intelligent diagnostic system is developed and the problem of diagnosing the technical condition of objects performing information signal transformations is solved. The possibility of managing redundancy in the complex of on-board equipment using an intelligent diagnostic system is justified. The principle of constructing such a system is implemented in the interests of solving the problem of automatically constructing a diagnostic model of the diagnostic object through the use of artificial intelligence methods. This allows you to implement in the form of software a unified (invariant to various objects) intelligent diagnostic system in the on-board equipment complex, built on the principle of integrated modular avionics. In turn, an important feature of the implementation and application of an intelligent diagnostic system is the possibility of functioning (training) and completing a task for its intended purpose (diagnostics of a technical condition) in real time. The learning process of an intelligent diagnostic system can be carried out in two main ways: training with a teacher (which is most relevant in the process of testing an object of aviation equipment for reliability), and training without a teacher (is a completely autonomous way, most relevant in the process of testing an object of control or intended use) In the process of testing the object of control for reliability, an intelligent diagnostic system will form an intelligent database of models of the initial (correct) functioning of the object of control of the complex of on-board equipment with subsequent recognition of precautionary states and their classification (clustering).

Keywords: functional information redundancy, intelligent diagnostic system, on-board equipment complex.

For citation: Bukirev A.S., Savchenko A.Y., Yatsechko M.I., Malyshev V.A. Diagnostic system of the technical condition of the complex of aircraft on-board equipment based on intelligent information technologies. *Modeling, Optimization and Information Technology*. 2020;8(1). Available from: https://moit.vivt.ru/wp-content/uploads/2020/02/BukirevSoavtors_1_20_1.pdf DOI: 10.26102/2310-6018/2020.28.1.010 (In Russ).

Введение

Проблема обеспечения безотказности комплекса бортового оборудования (КБО) современных воздушных судов (ВС) является необходимым условием поддержания высокого уровня безопасности полетов. Широкий круг подходов к решению данной проблемы обуславливает отсутствие определенной организационно-информационно-технологической унификации: во-первых, в диагностике технического состояния элементов КБО, как средства получения требуемой информации; во-вторых, в управлении избыточностью в КБО, как средству поддержания его безотказности на приемлемом уровне в условиях возникновения различных видов отказов его элементов. Решение задачи унификации представленных средств позволит построить систему управления техническим состоянием КБО с целью решения проблемы обеспечения его безотказности.

Актуальность

Безопасность полетов – важнейшее комплексное свойство ВС, требования к которому должны выполняться в масштабах всей авиации страны безотносительно ее правового положения. Одним из важнейших свойств ВС и их составных частей, обеспечивающих безопасность полетов является безотказность – свойство объекта непрерывно сохранять способность выполнять требуемые функции в течение некоторого времени или наработки в заданных режимах и условиях применения [1].

Актуальность данной работы подчеркивается повышением безопасности полетов за счет решения задачи обеспечения безотказности КБО ВС на основе унификации методов и средств диагностики и управления избыточностью в КБО.

Постановка задачи

Для обеспечения безотказности КБО предлагается разработать подход к построению унифицированной системы диагностики технического состояния КБО ВС на основе интеллектуальных информационных технологий для формирования общих подходов к разработке методов и средств диагностики технического состояния и управления избыточностью в КБО.

Концепция применения интеллектуальных информационных технологий для формирования общих подходов к решению представленных задач должна базироваться на оптимальной, с точки зрения простоты ее реализации, архитектуре КБО.

Перспективным направлением развития принципов построения КБО является концепция интегрированной модульной авионики (ИМА) [2, 3], которая характеризуется открытой сетевой архитектурой в отличие от классических централизованных и федеративных КБО. Она позволяет формировать комплекс как необходимый набор датчиков информации, исполнительных устройств и вычислителей (вычислительной системы) с унифицированным программным обеспечением, объединенные мультиплексным каналом информационного обмена (МКИО).

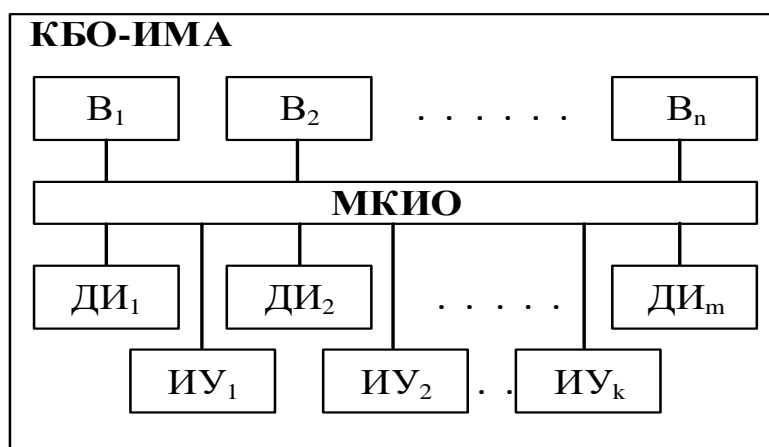


Рисунок 1 – КБО на основе концепции ИМА
Figure 1 – АЕС based on the concept of IМА

Весь объем информации, циркулирующий в КБО, доступен внешним потребителям через МКИО. Эта особенность значительно расширяет возможности построения системы диагностики и управления избыточностью в КБО на основе интеллектуальных информационных технологий.

Таким образом, необходимо разработать интеллектуальную диагностическую систему для диагностики технического состояния и управления избыточностью в КБО на основе архитектуры ИМА.

Теоретическая часть

В работе [3] система управления избыточностью включает две подсистемы:

1. мониторинга (обнаружения, локализации) отказов и повреждений;
2. реконфигурации структуры БРЭО в реальном времени.

Данная структура должна быть несколько модифицирована под систему управления избыточностью на основе интеллектуальных информационных технологий и будет включать подсистемы:

- 1) диагностики (определение технического состояния элементов КБО и локализация отказавшего элемента);
- 2) информационной реконфигурации (изменение порядка обработки и передачи информации в КБО с целью сохранения его работоспособности при отказе отдельных элементов).

Далее будет рассмотрена проблема разработки подсистемы диагностики.

Построение КБО по принципу ИМА позволит реализовать диагностическую подсистему в виде программного обеспечения (для элементов КБО (далее – элементов), входные и выходные сигналы которых циркулируют в вычислительной сети КБО) и комплекта специализированных датчиков (для диагностики измерительных элементов). При этом возникает проблема унификации диагностических систем отдельных элементов в рамках концепции ИМА [4].

В основном, данная проблема является следствием существующих принципов построения систем диагностирования, в основе которых лежит применение строго определенных диагностических моделей для каждого объекта контроля (ОК). Их разработка и идентификация является, с одной стороны, трудоемкой интеллектуальной работой, а с другой – не позволяет строить диагностические системы, инвариантные к принципиально различным ОК.

При решении задач технической диагностики применяются различные методы и средства интеллектуальных информационных технологий, в том числе построенные на базе алгоритмов функционирования искусственных нейронных сетей (ИНС) различной архитектуры построения и специфики выполняемых задач. В данной работе рассмотрен принцип диагностирования объектов, выполняющих различные преобразования сигналов, на основе ИНС. Принцип функционирования ИНС заключается в построении неявно выделенной функциональной зависимости выходных сигналов ОК от входных сигналов, тем самым решая неформализуемую задачу без априорного определения алгоритма функционирования ОК.

Предлагается решение данной задачи на основе применения интеллектуальной диагностической системы (ИДС) [4]. Принцип построения такой системы реализуется в интересах решения задачи автоматического построения диагностической модели ОК за счет применения интеллектуальных информационных технологий. Это позволяет построить унифицированную ИДС (в виде программного обеспечения) инвариантную к различным ОК. Специализировать необходимо только исполнение датчиков информации, преобразующих входные и выходные сигналы ОК (в качестве которых выступают измерительные элементы) в цифровой вид. Схема взаимодействия ОК и ИДС представлена на Рисунке 2.

На Рисунке 2: ОК – объект контроля; $D_{x_1} \dots D_{x_n}, D_{y_1} \dots D_{y_m}$ – датчики, преобразующие входные и выходные сигналы в цифровой вид; $x_1 \dots x_n$ – входные сигналы ОК; $y_1 \dots y_m$ – выходные сигналы ОК; ИДС – интеллектуальная диагностическая система; $S_0, S_1 \dots S_k$ – состояния системы.

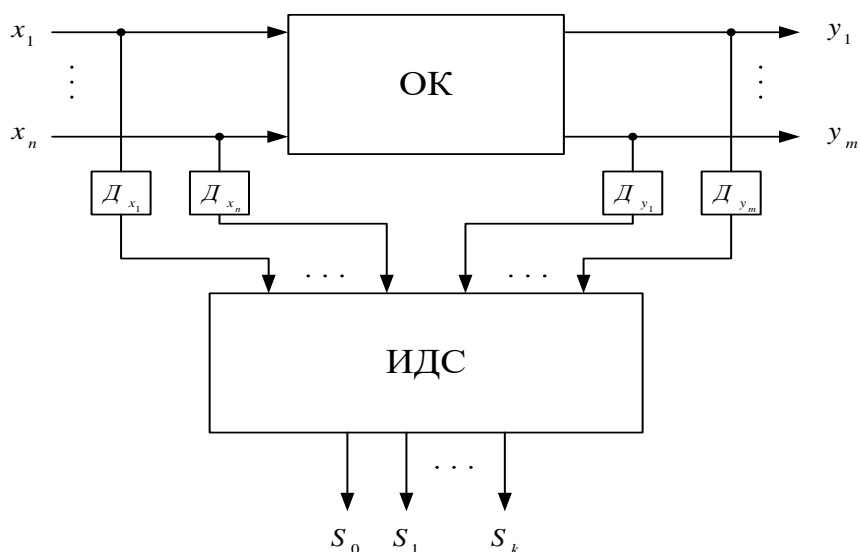


Рисунок 2 – Схема взаимодействия объекта контроля и интеллектуальной диагностической системы

Figure 2 – Scheme of interaction of the control object and intellectual diagnostic system

Принцип построения ИДС обеспечивает:

1) обучение (формирование моделей работоспособного состояния ОК, функционирования ОК в предотказном состоянии, отказа и при необходимости других состояний);

2) запоминание (создание базы данных (знаний), включающих сформированные модели);

3) распознавание состояний, в том числе предотказного состояния и отказа (например, распознавание образа (состояния) как отнесение текущей информации (точка с координатами (x_i, y_i)) по классам: S_0 – работоспособное состояние ОК; S_1 – предотказное состояние ОК; S_2 – состояние отказа ОК) и выдачу информации о ТС ОК потребителю.

Задачи, решаемые ИДС:

1) построение функций $y_i^* = f(x_j)$, описывающих связь выходных и входных сигналов (аппроксимация функций);

2) определение границ допусков для $y_i^* = f(x_j)$ (допусков функциональных зависимостей), характеризующих переход в соответствующее состояние (например, предотказное состояние S_1 и состояние отказа S_2);

3) контроль нахождения текущих точек (x_i, y_i) в допусках функциональных зависимостей $y_i^* = f(x_j)$, определение технического состояния ОК и выдача результатов потребителю.

Вторая и третья задачи могут быть решены на основе методов классификации образов или кластеризации. При этом основное отличие от метода аппроксимации функций заключается в том, что определение границ областей соответствующих состояний осуществляется не в форме функций, а в форме характерного распределения множества точек, образующего классы или кластеры.

Метод классификации образов основан на определении принадлежности входного образа, представленного вектором признаков, к одному или нескольким предварительно определенным классам [5]. Данный метод предусматривает способ обучение ИДС с учителем (определение классов (границ областей функционирования) осуществляется разработчиком ИДС – задача минимум) и без учителя (определение классов (границ областей) осуществляется автоматически самой ИДС – задача максимум) [4].

Метод кластеризации подразумевает, что обучающее множество не имеет меток классов. Алгоритм кластеризации основан на подобии образов и помещает похожие образы в один кластер [5]. Данный метод предусматривает способ обучение ИДС без учителя, результат которого представлен на Рисунке 3 [4].

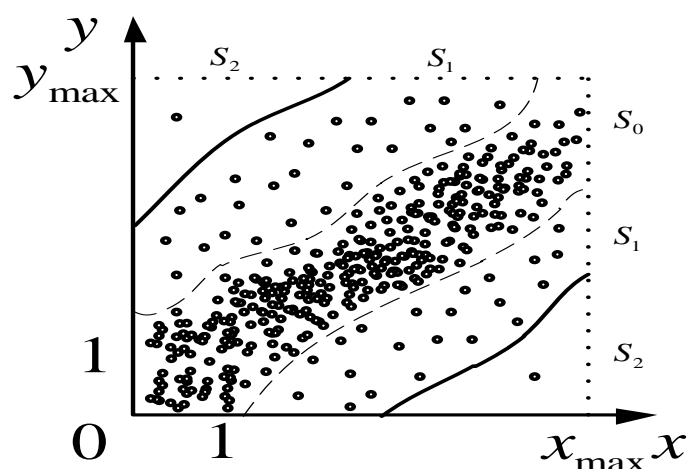


Рисунок 3 – Результат обучения ИДС на основе методов классификации образов или кластеризации
 Figure 3 – The result of training IDS on the basis of image classification or clustering methods

Важной особенностью применения ИДС является возможность диагностики ОК, функционирующего по назначению. ИДС имеет два основных режима: обучение и диагностика. Первые две задачи относятся к обучению, а третья – к диагностике [4].

Обучение ИДС может реализовываться двумя основными способами:

- 1) обучение с учителем (например, в процессе испытаний на надежность);
- 2) обучение без учителя (например, в процессе испытаний или применения по назначению).

Первый способ представляет собой автоматизированное формирование моделей функционирования ОК в различных состояниях. Первый этап – автоматическое построение ИДС функциональных зависимостей $y_i^* = f(x_j)$, $i = \overline{1, m}$, $j = \overline{1, n}$. Вторым этапом – ввод в ИДС, определенных на основе статистических данных видов и границ допусков функциональных зависимостей. Данный способ целесообразно применять на этапе испытаний ОК на надежность, когда в результате длительных экспериментов набирается достаточно статистических данных для определения видов и границ вышеуказанных допусков, которые прописываются в соответствующей нормативно-технической и эксплуатационной документации, а также вводятся в ИДС.

Второй способ является полностью автоматическим и характеризует автономность ИДС относительно процесса формирования допуска функциональных зависимостей. В зависимости от особенностей ОК могут быть выделены различные совокупности его технических состояний $\{S_l\}, l = \overline{1, k}$. Если существует закономерность перехода ОК из работоспособного состояния S_0 в состояние отказа S_2 , то возможно установить допуск функциональной зависимости, определяющий предотказное состояние S_1 . В случае, когда отказ ОК возникает внезапно, и установить закономерность его наступления невозможно, то назначается граница допуска функциональной зависимости, отделяющая работоспособное состояние S_0 от состояния отказа S_2 [4].

Результаты экспериментальных исследований

Рассмотрим процесс сбора данных для искусственной нейронной сети, являющейся основой при создании интеллектуальной диагностической системы, для обучения на примере модели выпрямительного устройства, реализованного в пакете «Simulink» среды объектно-ориентированного программирования Matlab, представленного на Рисунке 4.

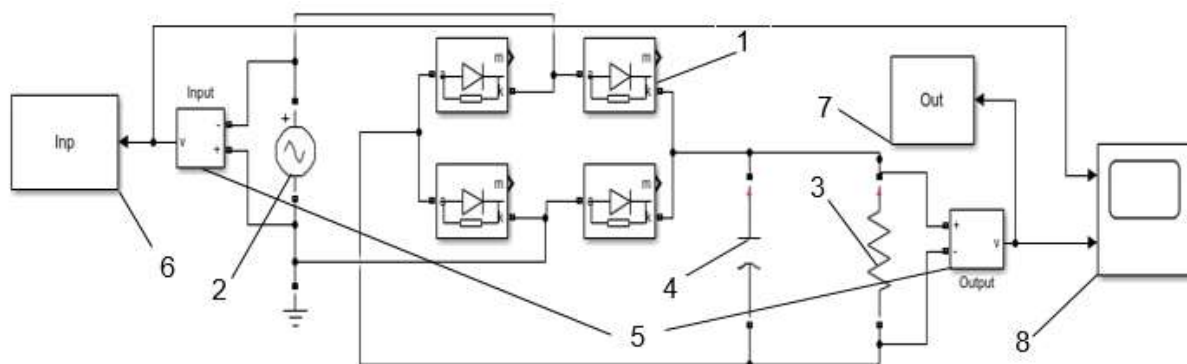


Рисунок 4 – Модель выпрямительного устройства
 Figure 4 – Model of the rectifier device

На Рисунке: 1 – выпрямительные диоды; 2 – источник переменного тока; 3 – резистор; 4 – конденсатор; 5 – измерительные вольтметры; 6 – блок сбора обучающих входных данных; 7 – блок сбора обучающих выходных данных; 8 – осциллограф.

Модель выпрямительного устройства реализует преобразование имитации переменного напряжения источника переменного тока постоянной частоты в напряжение постоянного тока с высоким коэффициентом выпрямления. График выпрямленного напряжения представлен на Рисунке 5.

В исправном состоянии модели выпрямительного устройства с помощью блоков «Inp» и «Out» осуществляется генерация массива эталонных обучающих данных в рабочую область Matlab при инициализации одного цикла функционирования, заданного временным рядом [6]. После чего осуществляется обучение нейронной сети на основе обучающей выборки.

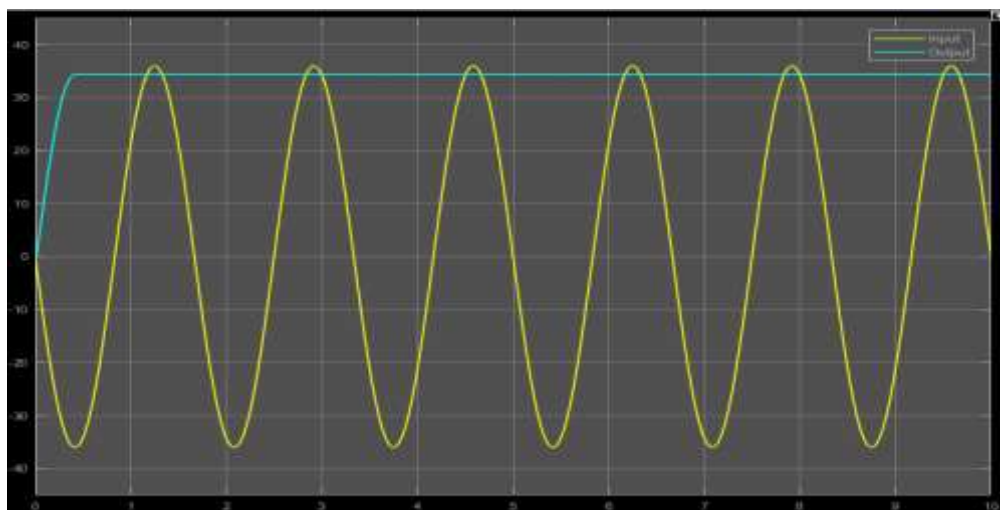


Рисунок 5 – График выпрямленного напряжения
 Figure 5 – Graph of rectified voltage

Далее производится создание двухслойной сети Элмана с массивом входов и диапазоном значений $[minmax(p)]$, которая имеет 100 нейронов в скрытом слое и функцией активации *tansig* (гиперболический тангенс) и одним нейроном в выходном слое с линейной функцией активации *purelin*. При обучении был выбран обучающий алгоритм «Levenberg-Marquardt», обеспечивающий быстрое обучение ИНС с существенной затратой оперативной памяти. Указанная сеть формируется с помощью команды:

$net=newff([minmax(p)],[100 \ 1])$, затем выполняется обработка массивов обучающей выборки:

1. Создание сети: $Y=sim(net,Inp)$;
2. Задание количества циклов обучения, после которых будет завершено обучение сети: $net.trainParam.epoch=500$;
3. Задание интервала вывода информации: $net.trainParam.show=100$;
4. Команда для выполнения процедуры обучения:
 $net=train(net,Inp,Out)$;
5. Моделирование спроектированной сети: $Y=sim(net,Inp)$.
6. Структура созданной сети, и графики ее обучения представлены на Рисунках 6, 7.

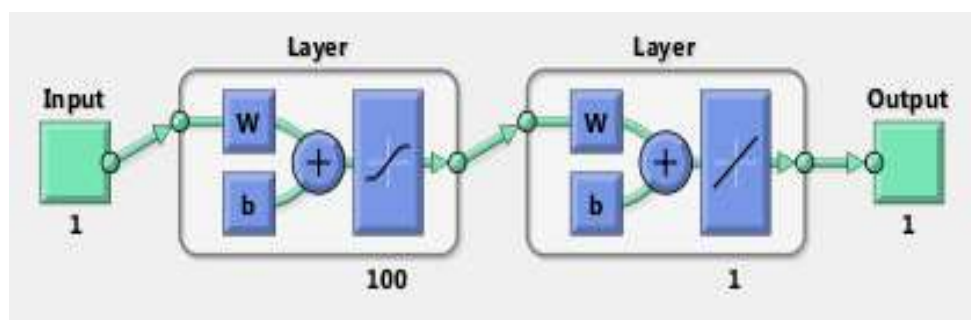
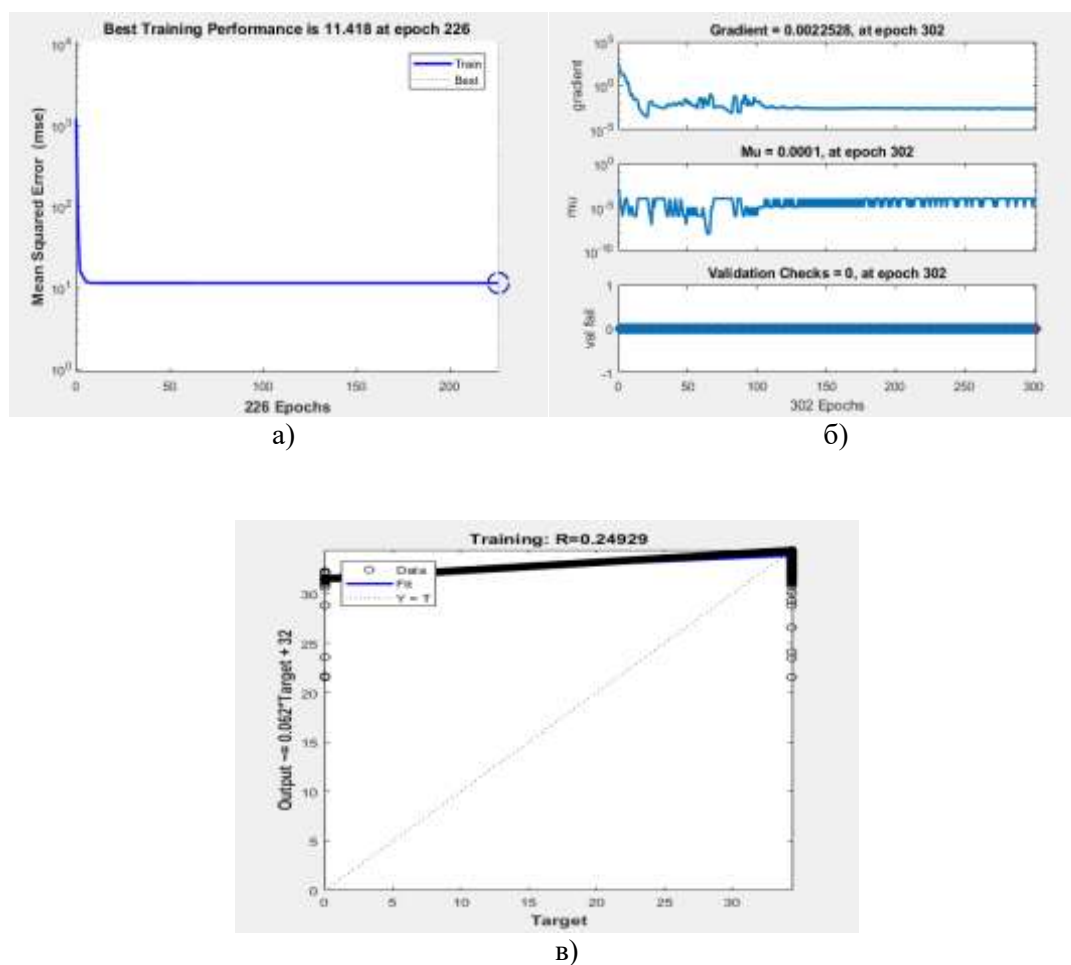


Рисунок 6 – Структура создаваемой ИНС
 Figure 6 – Structure of the generated ANN



- а) – график зависимости среднеквадратичной ошибки (СКО) от количества эпох обучения;
 б) – график зависимости величины градиента и проверочных данных от количества эпох обучения;
 в) – график регрессии.

Рисунок 7 – График процесса обучения ИНС
 Figure 7 – Graph of the process of training ANN

Завершив алгоритм обучения, структурный блок ИНС включается параллельно ОК для оценки расхождения преобразованного сигнала (имитации выпрямленного напряжения), то есть осуществляется замер величины отклонения сигнала выпрямительного устройства от величины сигнала, преобразованного ИНС, и ставшего эталоном (Рисунки 8,9).

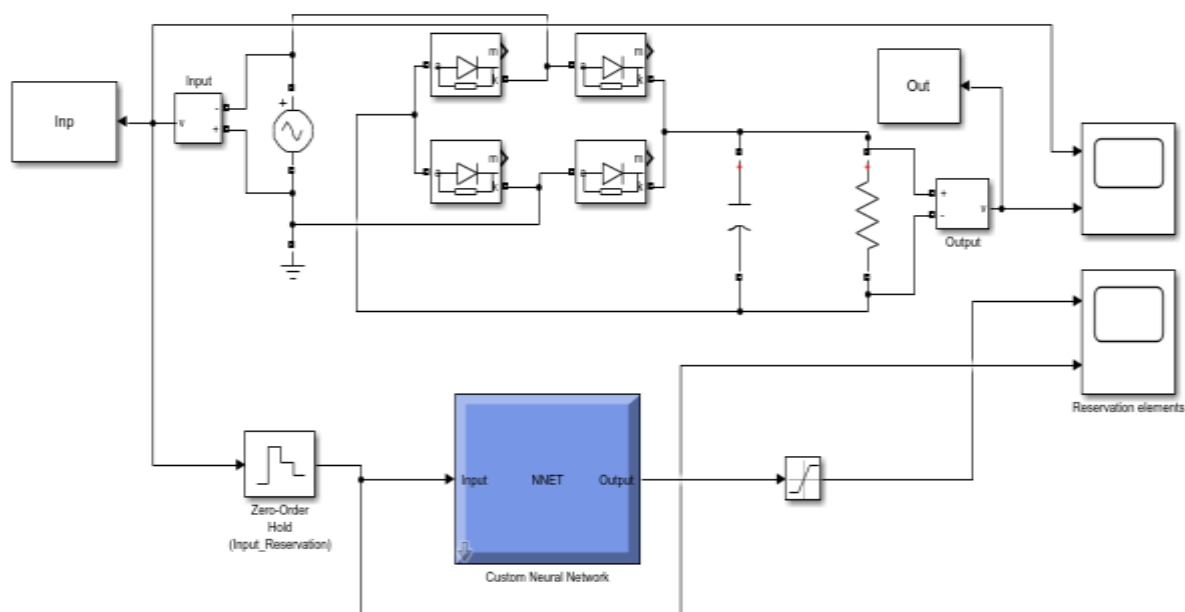


Рисунок 8 – Включение ИНС на параллельную работу ОК
 Figure 8 – Enabling ANN for parallel operation OC

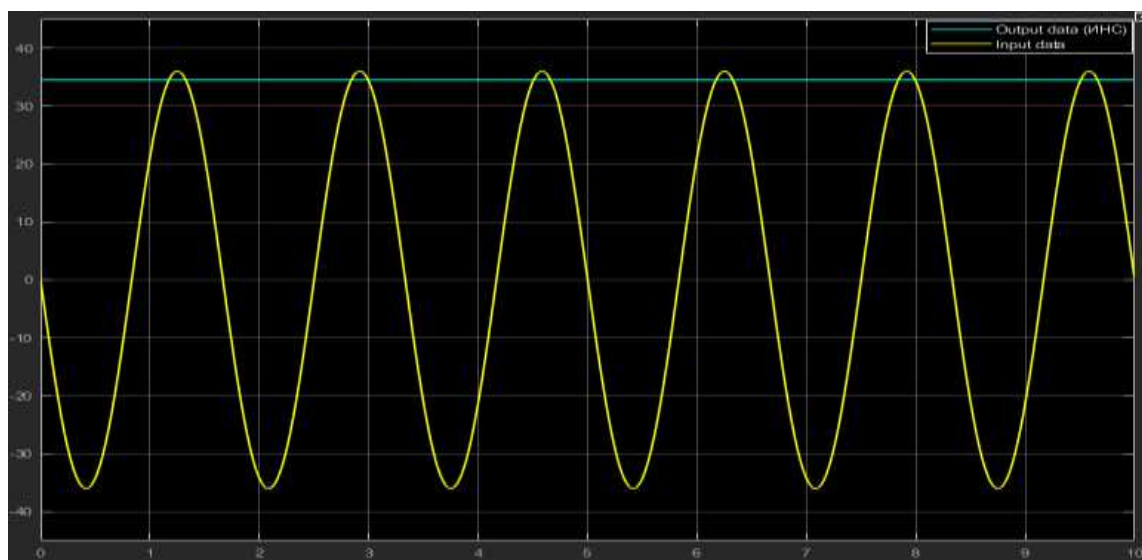


Рисунок 9 – График эталонного сигнала, преобразованного ИНС
 Figure 9 – Graph of a reference signal converted by ANN

Анализ графика, представленного на Рисунке 9, позволяет сделать вывод о том, что даже простейшая, обученная ИНС в полной мере воспроизводит и справляется с решением задач аппроксимации функциональных зависимостей.

Заключение

Предложенный принцип построения ИДС позволит создать унифицированную диагностическую систему инвариантную к различным ОК, реализуемую в виде программного обеспечения (исключение – информационные элементы КБО, для

диагностики которых необходимо создавать специализированные датчики). Очевидно, что данный принцип теоретически позволит создать многомерную, комплексную ИДС, для контроля технического состояния КБО. Это обеспечит решение проблемы создания диагностической подсистемы системы управления избыточностью в КБО с целью решения проблемы обеспечения его безотказности. В ближайшей перспективе интеллектуальные диагностические системы позволят осуществлять диагностику технического состояния объектов различной сложности и архитектуры, являясь унифицированными интеллектуальными диагностическими системами, инвариантными к любым классам и видам используемой информации.

ЛИТЕРАТУРА

1. ГОСТ 27.002-2015 *Надежность в технике (ССНТ). Термины и определения*. М.: Издательство стандартов, 2015.
2. Чернодаров А.В., *Контроль, диагностика и идентификация авиационных приборов и измерительно-вычислительных комплексов*. М.: ООО «Научтехлитиздат», 2017.
3. Буков В.Н., Евгенов А.В., Шурман В.А. Интегрированные комплексы бортового оборудования с управляемой функциональной избыточностью. *Сборник пленарных докладов V Международной научно-практической конференции «Академические Жуковские чтения» (22–23 ноября 2017 г.)*. Воронеж: ВУНЦ ВВС «ВВА», 2017.
4. Савченко А.Ю., Букирёв А.С., Васильченко А.С., Озеров Е.В. Авиакосмические технологии «АКТ–2018»: *Труды XIX Международной научно-технической конференции и школы молодых ученых, аспирантов и студентов, (18–19 октября 2018 г.)* Воронеж: ООО Фирма «Элист»; 2018:398–405.
5. Раннев Г.Г. *Интеллектуальные средства измерений: учебник для студ. высш. учеб. заведений*. М.: Издательский центр «Академия», 2011.
6. Веселов О.В., Сабуров П.С. *Методы искусственного интеллекта в диагностике: учебное пособие*. Владимирский гос. ун-т им. А.Г. и Н.Г. Столетовых. – Владимир: Изд-во ВлГУ, 2015.

REFERENCES

1. GOST 27.002-2015 *Reliability in technology (SSTN). Terms and Definitions*. M. : Izdatelstvo standards, 2015.
2. Chernodarov A.V., *Control, diagnostics and identification aviation devices and measuring and computing systems*. M. : LLC Naughtekhlitizdat, 2017..
3. Bukov V.N., Evgenov A.V., Shurman V.A. Integrated complexes of airborne equipment with controlled functional redundancy. *Collection of plenary reports of the V International Scientific and Practical Conference "Academic Zhukovsky Readings" (November 22–23, 2017)*. Voronezh: Air Force Research Center "VVA", 2017.
4. Savchenko A.Y., Bukirev A.S., Vasilchenko A.S., Ozerov E.V. *Aerospace Technologies AKT-2018: Proceedings of the XIX International Scientific and Technical Conference and the School of Young Scientists, Graduate Students and Students, (October 18–19, 2018)* Voronezh: LLC Firm Elist; 2018:398–405.
5. Rannev G.G. *Intelligent measuring tools: a textbook for students. higher textbook. Institutions*. M.: Publishing Center "Academy", 2011.

6. Veselov O.V., Saburov P.S. *Methods of artificial intelligence in the diagnosis: a training manual*. Vladimir state. University named after A.G. and N.G. Centennial. - Vladimir: VISU Publishing House, 2015.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Букирёв Александр Сергеевич, инженер группы обслуживания авиационного оборудования 39 ВП 4 А ВВС и ПВО (г. Джанкой, республика Крым), Российская Федерация.

e-mail: bukirev@inbox.ru

Alexander S. Bukirev, Engineer of the Aviation Equipment Maintenance Group 39 VP 4 A of the Air Force and Air Defense (Dzhankoy, Republic of Crimea), Russian Federation.

Савченко Андрей Юрьевич, кандидат технических наук, доцент кафедры эксплуатации авиационного оборудования, ВУНЦ ВВС «ВВА», Воронеж, Российская Федерация.

e-mail: savaau@mail.ru

Andrey Y. Savchenko, Candidate of Technical Sciences, Assistant professor of the Department of Operation of Aviation Equipment, Air Force Academy, Voronezh, Russian Federation.

Яцечко Михаил Иванович, адъюнкт кафедры эксплуатации авиационного оборудования, ВУНЦ ВВС «ВВА», Воронеж, Российская Федерация.

e-mail: yatsechko@list.ru

Mikhail I. Yatsechko, Adjunct Department of Operation of Aviation Equipment, Air Force Academy, Voronezh, Russian Federation.

Мальшев Владимир Александрович, доктор технических наук, профессор, ВУНЦ ВВС «ВВА», Воронеж, Российская Федерация.

e-mail: vamalyshev@list.ru

Vladimir A. Malyshev, Doctor of Technical Sciences, Professor, Air Force Academy, Voronezh, Russian Federation.