

УДК 004.052.3

DOI: 10.30987/article\_5bb5e6f323cf39.47317213

Н.В. Суханова

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ОТКАЗОВ ЭЛЕКТРОННЫХ СХЕМ С ПОМОЩЬЮ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ

Рассмотрена автоматизация испытаний на надежность за счет моделирования отказов элементов электронных схем с помощью нейронных сетей. Описан разработанный стенд для моделирования отказов элементов электронных схем.

**Ключевые слова:** электронные схемы, моделирование отказов, работоспособное состояние, неработоспособное состояние, искусственные нейронные сети.

N.V. Sukhanova

## ELECTRONIC CIRCUIT FAILURE MODELING USING NEURAL NETWORKS

The object of researches is electronic circuits. For elements of the circuit there are defined characteristics of input and output signals in a working condition and at a state of non-operability. The subject of researches is a reliability of electronic circuits (EC). The purpose of the work consists in the automation of reliability tests at the expense of the failure simulation of electronic circuit elements with the aid of artificial neural networks (ANN). There is developed a method for carrying out EC reliability tests with the use of automation means. During tests one simulates different failures of circuit elements. For element failure simulation there are used ANN trained fragments. The ANN

fragments are trained with the use of the selection of input and output signals of the element in a working condition and at a state non-operability. For the signal formation of a working condition a signal generator is used. For the signal formation of a state of non-operability the signals from outputs of a noise generator are added. To reduce time and costs for training there is offered for use the ANN of a special switch type which allows copying, replicating, modifying ANN, training and forming ANN from its fragments.

**Key words:** electronic circuits, failure modeling, working condition, state of non-operability, artificial neural networks.

Объектом исследования является цифровая электронная схема (ЭС). Предмет исследования - надежность ЭС. Метод исследования - моделирование отказов [1].

Рассмотрены отказы ЭС, вызванные отказами элементов. В цифровых электронных схемах происходят следующие отказы элементов:

- «константа 0» (формирование на выходе элемента постоянного сигнала уровня 0, не зависящего от сигналов на его входах);

- «константа 1» (формирование на выходе элемента постоянного сигнала уровня 1, не зависящего от сигналов на его входах);

- обрыв (отсутствие сигналов на входе или выходе элемента);

- короткое замыкание (на выходе элемента формируется такой же сигнал, что и на одном из его входов);

- помехи на входе или выходе элемента (на входе или выходе элемента формируются случайные сигналы);

- параметрические отказы (со временем происходит постепенное изменение уровня и выход сигнала за заданные границы) и др.

Моделирование позволяет выявить отказы элементов, которые приводят к нарушению работоспособности ЭС.

Рассмотрена ЭС, построенная из стандартных элементов. При разработке ЭС необходимо провести анализ влияния отказов элементов на работоспособное состояние схемы. Элементы, из которых строятся ЭС, характеризуются высоким уровнем надежности и безотказности. Отказы элементов в ЭС происходят редко. Чтобы получить и обработать данные об отказах элементов ЭС, необходима выборка объемом в несколько сотен и тысяч значений времени наработки до отказа. Сбор

и анализ статистических данных требуют значительных затрат, связанных с продолжительными испытаниями. Вместо испытаний на надежность используют моделирование отказов. Таким образом, моделирование отказов ЭС является важной и актуальной задачей.

Необходимо автоматизировать испытания на надежность. Новым и перспективным направлением в исследовании надежности является применение искусственных нейронных сетей. В работе предложены модели надежности элементов ЭС, реализованные на базе обученных искусственных нейронных сетей (ИНС).

За основу разработки был принят способ испытания на безотказность, предложенный в [2]. Способ предложен для испытания безотказности элементов ЭС. Отказы элементов ЭС распределены в соответствии с экспоненциальным законом. Моделируют параметрические отказы, когда известны начальное и конечное значения контролируемого параметра, а также среднее время наработки до отказа. Испытание проводят в течение суммарной длительности, которая существенно меньше среднего времени наработки до отказа. Предполагается, что контролируемый параметр непрерывно изменяется по экспериментальной кривой, которая аппроксимируется экспоненциальной функцией. На экспериментальной кривой отмечают интервалы длительности испытаний, измеряют параметр в начале и конце каждого интервала и сравнивают конечное значение с теоретически предсказанным. По результатам сравнения делают выводы, что среднее время наработки до отказа устройства соответствует или не соответствует установленным требованиям. Способ позволяет сократить продолжительность испытаний. Средняя наработка на отказ для элементов электронных схем измеряется десятками и сотнями тысяч часов. Уменьшение времени испытаний в несколько раз не исключает необходимость испытаний и

не позволяет существенно сократить затраты на их реализацию.

Суммарное количество входных и выходных сигналов всех элементов ЭС  $n$  может измеряться десятками и тысячами, а количество разных комбинаций входных и выходных сигналов  $C_n^k$  - десятками тысяч. Необходимо автоматизировать проведение испытаний ЭС на надежность, разработать методы испытаний и специализированные стенды для их проведения.

При испытаниях элемента традиционными методами происходит его разрушение, когда имитируют короткое замыкание контактов, токи утечки, обрыв контактов, подают на вход измененные и зашумленные сигналы. После таких испытаний элемент может быть неисправен и непригоден к дальнейшему использованию.

Задача разработки стенда для испытаний на надежность состоит в том, чтобы исследовать работоспособность ЭС неразрушающими методами, имитировать отказы элементов с помощью моделирования, без нарушения их работоспособности.

Предложен новый способ проведения неразрушающих испытаний на надежность, при котором элементы ЭС сохраняют работоспособность.

Для взаимного соединения элементов схемы друг с другом использован коммутатор [3]. В коммутаторе имеется внутренняя память ОЗУ, где записана таблица взаимных связей его входов и выходов. Таблица взаимных связей коммутатора содержит информацию в двоичном виде. Элементы  $x[i,j]$  таблицы взаимных связей принимают значения 0 или 1:

- если  $i$ -й вход коммутатора не связан с  $j$ -м выходом, то  $x[i,j]=0$ ;

- если  $i$ -й вход коммутатора связан с  $j$ -м выходом, то  $x[i,j]=1$ .

Коммутатор реализует взаимное соединение входов и выходов на основе информации, записанной в ОЗУ. Входы и выходы элемента подсоединяют к входам и выходам коммутатора (рис. 1).

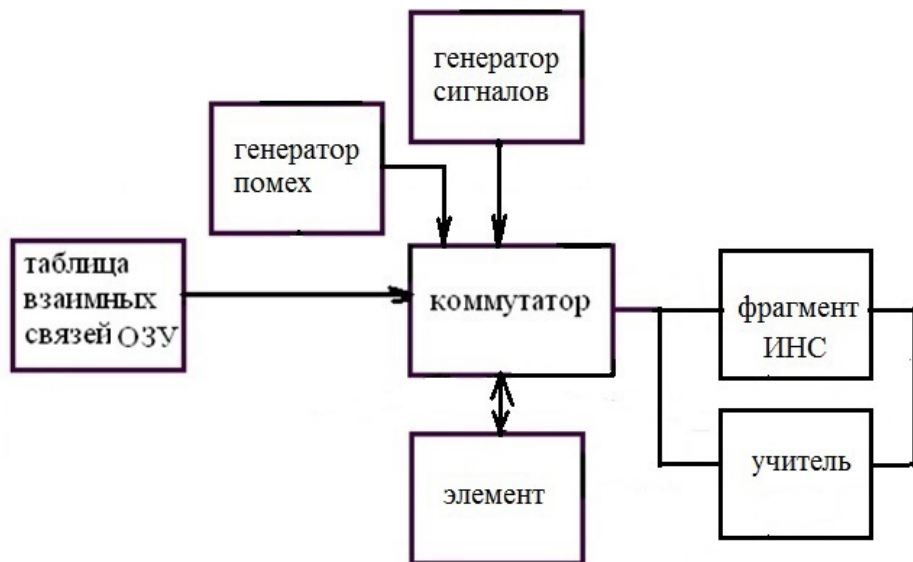


Рис. 1. Обучение фрагмента ИНС по входным и выходным сигналам элемента в работоспособном состоянии

С помощью коммутатора входы и выходы элемента схемы подсоединяют к фрагменту ИНС. Фрагмент ИНС обучают и используют как модель элемента. Чтобы обучить фрагмент ИНС, необходима выборка обучающих примеров, содержащая большое число значений входных и выходных сигналов элемента.

Для обучения фрагмента ИНС используется схема, приведенная на рис. 1. Фрагменты ИНС обучаются по входным и выходным сигналам элемента в работоспособном и неработоспособном состояниях. Обучающая выборка формируется автоматически как набор входных и выходных сигналов элемента сначала в работоспособном, а затем в неработоспособном состоянии. В работоспособном состоянии на входы элемента подают сигналы с выходов генератора. На выходах элемента формируются сигналы работоспособного состояния. Входные и выходные сигналы работоспособного элемента подают на входы ИНС для ее обучения.

Для моделирования отказов элемента используют модель элемента на базе ИНС (рис. 2). Для формирования обучающей выборки в неработоспособном состоянии используют дополнительный генератор помех и модель работоспособного элемен-

та на базе ИНС. На входы модели элемента через коммутатор подают смесь входных сигналов и помех. Модель формирует выходные сигналы в работоспособном состоянии элемента. Затем к выходным сигналам элемента добавляют помехи, имитирующие его неустойчивую работу и отказы. Результирующие входные и выходные сигналы неработоспособного элемента через коммутатор передают на входы ИНС для обучения.

Для моделирования различных отказов элементов используют генератор помех. Генератор помех может имитировать зашумленные и аномальные сигналы как на входах, так и на выходах неисправных элементов. На входы модели элемента подают сумму сигналов с выходов генератора сигналов и генератора помех. На выходах модели элемента формируются сигналы по обучающей выборке работоспособного состояния. Коммутатор подключает выходные сигналы модели работоспособного элемента и сигналы с выходов генератора помех на входы фрагмента ИНС для обучения. Таким образом, входные и выходные сигналы неработоспособного состояния элемента передаются через коммутатор на входы фрагмента ИНС для обучения (рис. 2).

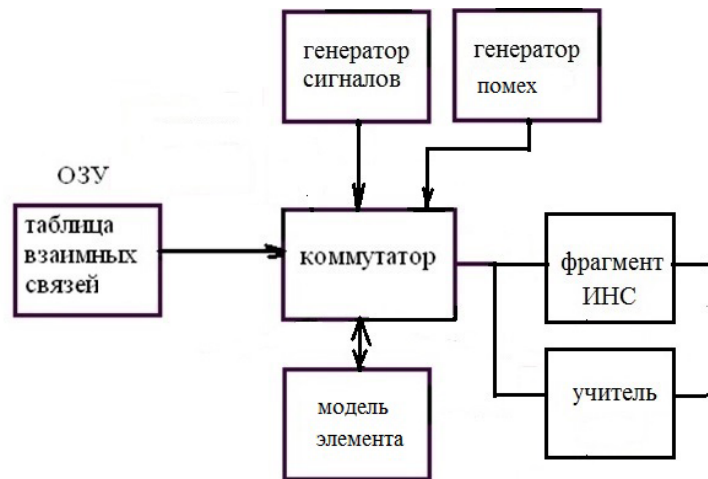


Рис. 2. Обучение фрагмента ИНС по входным и выходным сигналам элемента в неработоспособном состоянии

Для сокращения времени и затрат на обучение предлагается использовать ИНС особого коммутаторного вида, что позволяет копировать, тиражировать, модифицировать ИНС, обучать и формировать ИНС из ее фрагментов [4-6]. Применение ИНС особого коммутаторного вида для прогнозирования и оценки надежности программных средств описано в работах [7-10].

ИНС обучается по выборкам сигналов на входах и выходах элементов ЭС. После обучения ИНС имитирует работу элемента и формирует сигналы на его выходах в работоспособном и неработоспособном состояниях.

Если ЭС состоит из разных элементов, то требуется обучать разные фрагменты ИНС. Связи элементов ЭС между собой реализует коммутатор элементов (рис. 3), а взаимные связи соответствующих фрагментов обученной ИНС реализует коммутатор ИНС (рис. 4).

Разработан стенд для моделирования отказов ЭС (рис. 5). В этом стенде имеются коммутатор для соединения элементов и коммутатор для соединения фрагментов обученной ИНС. Соединение элементов - это реальная ЭС. На входы ЭС подаются сигналы с выходов генератора. Это эталон, который реализует работоспособное состояние ЭС.

Соединение фрагментов обученной ИНС реализует модель ЭС. Замена ЭС на ее модель позволяет имитировать отказы ЭС без ее разрушения и нарушения работоспособности элементов.

Сравнение входных и выходных сигналов ЭС и ее нейросетевой модели позволяет обнаружить отказы элементов, которые нарушают работоспособность схемы. Критерием отказа ЭС является несовпадение одноименных сигналов ЭС и ее нейросетевой модели.

На рис. 5 показана схема для автоматизации испытаний ЭС на надежность.

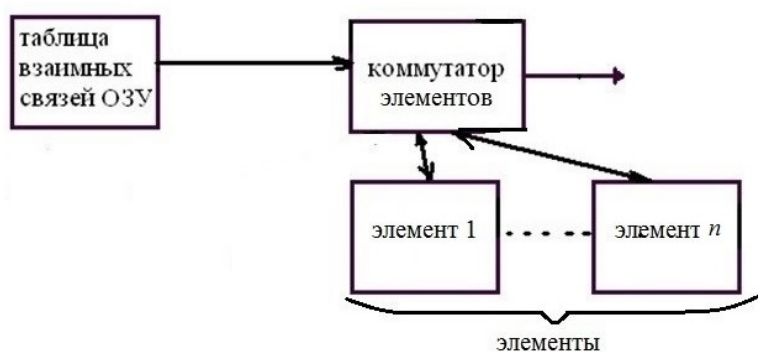


Рис. 3. Соединение элементов ЭС через коммутатор

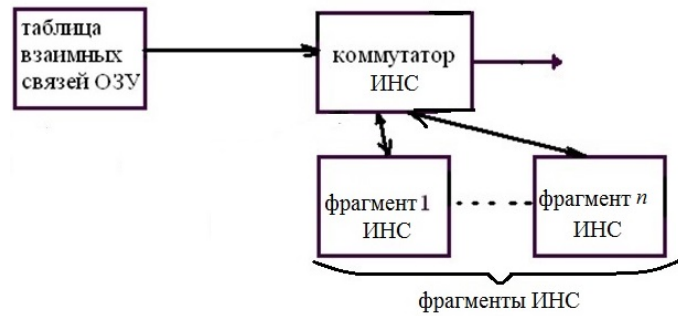


Рис. 4. Соединение обученных фрагментов ИНС через коммутатор

Стенд включает следующие элементы (рис. 5):

- коммутаторы, которые соединяют входы и выходы на основе таблицы взаимных связей;
- оперативное запоминающее устройство (ОЗУ), где записана таблица взаимных связей входов и выходов коммутатора;

- генератор сигналов;
- генератор помех;
- элементы схемы  $1...n$ , которые подключены к коммутатору по входам и выходам;
- фрагменты ИНС  $1...n$ , которые имитируют работу одноименных элементов ЭС в работоспособном и неработоспособном состояниях.

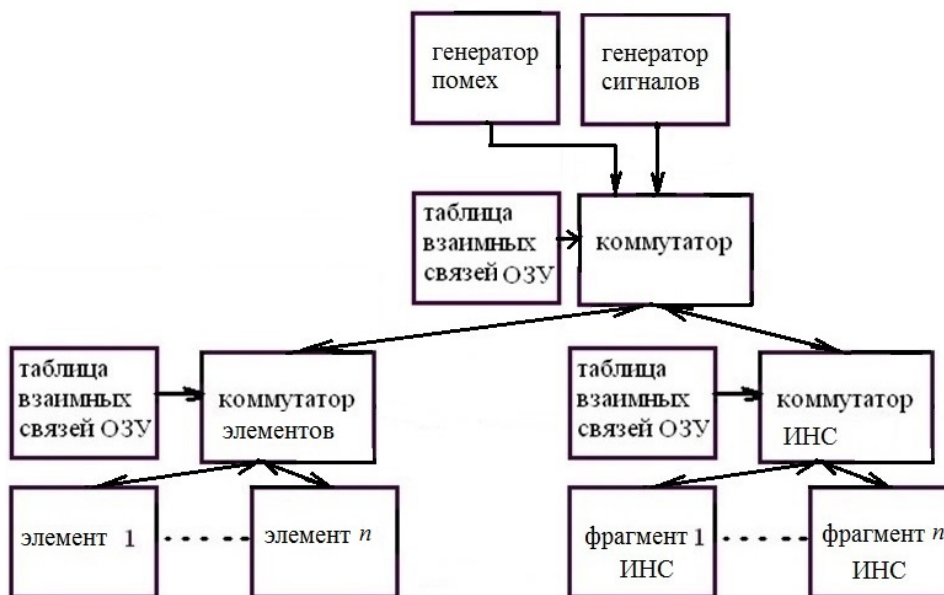


Рис. 5. Стенд для моделирования работы ЭС

При испытаниях моделируют работоспособное состояние ЭС. Для этого входы ЭС подключают к выходам генератора и формируют сигналы работоспособного состояния. Эти сигналы поступают на входы элементов ЭС через коммутатор.

Затем моделируют отказы одного или нескольких элементов и неработоспособное состояние ЭС. Для моделирования отказов используют соответствующие фрагменты ИНС.

Входные сигналы и помехи через коммутатор подают на входы фрагментов ИНС, имитирующих работу неисправных элементов.

В работоспособном состоянии входные и выходные сигналы элементов и соответствующих им фрагментов ИНС должны совпадать.

В неработоспособном состоянии входные и выходные сигналы элементов и

соответствующих им фрагментов ИНС должны иметь существенные различия.

Далее при испытаниях моделируют различные отказы нескольких взаимосвязанных элементов.

Номер отказавшего элемента можно генерировать случайным образом или последовательно имитировать отказы всех элементов по порядку. При моделировании неисправного элемента на входы фрагмента ИНС подают смесь сигнала и помех в неработоспособном состоянии. На выходе фрагмента ИНС формируются сигналы, которые имитируют состояние отказа элемента.

При испытаниях моделируют одиночный отказ элемента, множественные отказы элементов, цепочки отказов элементов.

Способ испытаний ЭС на надежность включает следующие этапы:

1. Создают модель элемента ЭС на базе фрагмента ИНС (рис. 1). Сначала фрагмент ИНС обучают по входным и выходным сигналам элемента в работоспособном состоянии. Генератор сигналов подсоединяют к входам элемента и подают сигналы работоспособного состояния. Формируют выходные сигналы элемента. Входные и выходные сигналы работоспособного элемента через коммутатор подают на входы фрагмента ИНС для его обучения.

2. После этого проводят дополнительное обучение фрагмента ИНС в неработоспособном состоянии элемента (рис. 2). Используют модель элемента на базе ИНС, которую создали на предыдущем этапе. Входные и выходные сигналы неработоспособного элемента через коммутатор подают на входы фрагмента ИНС для его дополнительного обучения.

3. Этапы 1-2 повторяют и обучают фрагменты ИНС для всех элементов схемы. Нейросетевые модели можно реализовать для элемента, компонента, составной части и всей ЭС.

4. Элементы ЭС соединяют между собой с помощью коммутатора. Формируют таблицу взаимных связей элементов и записывают ее в ОЗУ (рис. 3). Коммутатор соединяет элементы между собой, ис-

пользуя таблицу взаимных связей. Обученные фрагменты ИНС соединяют между собой так же, как и элементы ЭС (рис. 4).

5. Коммутаторы элементов и коммутаторы фрагментов ИНС подсоединяют по входам и выходам к коммутатору верхнего уровня (рис. 5). Коммутатор верхнего уровня позволяет переключать входные и выходные сигналы ЭС и ее модели, реализованной на базе ИНС. К входам коммутатора верхнего уровня подключают генераторы сигналов и генераторы помех (рис. 5).

6. Моделируют отказ элемента ЭС. На входы элемента подают сигналы работоспособного состояния с выходов генератора сигналов. На входы модели элемента на базе ИНС подают сигналы неработоспособного состояния. Сравнивают входы и выходы ЭС и ее модели, реализованной на базе обученной ИНС. Если обнаружено несовпадение, то отказ элемента приводит к отказу ЭС.

7. Если при отказе элемента входные и выходные сигналы модели на базе ИНС совпадают с сигналами на входах и выходах ЭС, то фиксируют работоспособное состояние. Отмечают, что ЭС устойчива к данному отказу. Отказ элемента не влияет на работоспособность схемы.

Итак, для элементов ЭС определены характеристики входных и выходных сигналов в работоспособном и неработоспособном состояниях.

Разработан метод проведения испытаний ЭС на надежность с применением средств автоматизации. При испытаниях моделируют различные отказы элементов схемы. Для моделирования отказов элементов использованы обученные фрагменты ИНС. Фрагменты ИНС обучают на выборке входных и выходных сигналов элемента в работоспособном и неработоспособном состояниях. Для формирования сигналов работоспособного состояния используется генератор сигналов. Для формирования сигналов неработоспособного состояния к полезному сигналу добавляются сигналы с выходов генератора помех.

Разработана схема стенда для проведения испытаний на надежность.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Беляев, Ю.К. Надежность технических систем: справочник / Ю.К. Беляев, В.А. Богатырев, В.В. Болотин [и др.]; под ред. И.А. Ушакова. - М.: Радио и связь, 1985. - 608 с.
  2. Пат. на изобрет. 2444741 Российская Федерация, МПК 7 G01R 31/26. Способ испытания безотказности устройства / Патрашин А.И., Болтарь К.О., Яковлева Н.И., Соляков В.Н.; заявитель и патентообладатель НПО «Орион». - № 2010130515; заявл. 20.07.10; опубл. 10.03.12, Бюл. № 7. - 5 с.
  3. Пат. на изобрет. 2139567 Российская Федерация, МПК G06F 15/163. Многофункциональный коммутатор / Князьков В.С., Васин Л.А.; заявитель и патентообладатель Пенз. технол. ин-т (ВТУЗ). - № [97109885](#); заявл. 11.06.97; опубл. 10.10.99, Бюл. № 10. - 5 с.
  4. Пат. на полез. модель 66831 Российская Федерация, МПК 7 G06G7/66. Нейронная сеть / Кабак И.С., Суханова Н.В.; заявитель и патентообладатель Кабак И.С., Суханова Н.В. - № 2007111998; заявл. 02.04.07; опубл. 27.09.07, Бюл. № 27. - 2 с.
  5. Пат. на полез. модель 72084 Российская Федерация, МПК 7G06G7/60, G06G7/62, G06G7/66. Доменная нейронная сеть / Кабак И.С., Суханова Н.В.; заявитель и патентообладатель Кабак И.С., Суханова Н.В. - № 2007144359; заявл. 03.12.07, опубл. 27.03.08, Бюл. № 9. - 2 с.
  6. Пат. на изобрет. 2398281 Российская Федерация, МПК 7 G06N 3/06. Многослойная модульная вычислительная система / Соломенцев Ю.М., Шептунов С.А., Кабак И.С., Суханова Н.В.; заявитель и патентообладатель Ин-т конструктор.-технол. информатики РАН. - № 2008143737; заявл. 07.11.08; опубл. 27.08.10, Бюл. № 24. - 8 с.
  7. Степанов, С.Ю. Алгоритм фрагментации больших нейронных сетей и исследование его схожимости / С.Ю. Степанов, И.С. Кабак // Информационные технологии. - 2012. - № 7. - С. 73-78.
  8. Sheptunov, S.A. Optimization of the Complex Software Reliability of Control Systems / S.A. Sheptunov, M.V. Larionov, N.V. Sukhanova, I.S. Kabak, D.A. Alshinbaeva // IEEE Conference on Quality Management, Transport and Information Security, Information Technologies. - 2016. - P. 225-228.
  9. Sheptunov, S.A. Simulating of reliability of robotics system software on basis of artificial intelligence / S.A. Sheptunov, M.V. Larionov, N.V. Sukhanova, M.R. Salakhov, Y.M. Solomentsev, I.S. Kabak // IEEE Conference on Quality Management, Transport and Information Security, Information Technologies. - 2016. - P. 193-197.
  10. Solomentsev, Yu.M. Assessing the reliability of CAD software by means of neural networks / Yu.M. Solomentsev, I.S. Kabak, N.V. Sukhanova // Russian Engineering Research. - 2015. - Vol. 35. - № 12. - P. 879-882.
1. Belyaev, Yu.K. Engineering system reliability: reference book / Yu.K. Belyaev, V.A. Bogatyryov, V.V. Bolotin [et al.]; under the editorship of I.A. Ushakov. - M.: *Radio and Communication*, 1985. - pp. 608. .
  2. Pat. for invention 2444741 the Russian Federation, IPC 7 G01R 31/26. *Method for Device Reliability Tests* / Patrashin A.I., Boltar K.O., Yakovleva N.I., Solyakov V.N.; SPC "Orion": applicant and patent holder. - No. 2010130515; applied 20.07.10; published 10.03.12, Bull. No.7. - pp. 5.
  3. Pat. for invention 2139567 the Russian Federation, IPC G06F 15/163. *Multifunctional Switchboard* / Knyazkov V.S., Vasin L.A.; Penza Technological Institute (TC).- No. [97109885](#); applied 11.06.97; published 10.10.99, Bull. No.10. - pp. 5.
  4. Pat. for utility model 66831 the Russian Federation, IPC 7 G06G7/66. *Neural Network* / Kabak I.S., Sukhanova N.V.; Kabak I.S., Sukhanova N.B.: applicants and patent holders. - No. 2007111998; applied 02.04.07; published 27.09.07, Bull. No.27. - pp. 2.
  5. Pat. for utility model 72084 the Russian Federation, IPC 7G06G7/60, G06G7/62, G06G7/66. *Domain Neural Network* / Kabak I.S., Sukhanova N.V.; Kabak I.S., Sukhanova N.V.: applicants and patent holders - No. 2007144359; applied 03.12.07, published 27.03.08, Bull. No.9. - pp. 2.
  6. Pat. for invention 2398281 the Russian Federation, IPC 7 G06N 3/06. *Multilayer Module Computer System* / Solomentsev Yu.M., Sheptunov S.A., Kabak I.S., Sukhanova N.V.; applicant and patent holder: Institute of Design Technological Informatics of RAS. - No. 2008143737; applied 07.11.08; published 27.08.10, Bull. No.24. - pp. 8.
  7. Stepanov Yu.S. Algorithm of large neural network fragmentation and investigation of its convergence / S.Yu. Stepanov, I.S. Kabak // *Information Technologies*. - 2012. - No.7. - pp. 73-78.
  8. Sheptunov, S.A. Optimization of the Complex Software Reliability of Control Systems / S.A. Sheptunov, M.V. Larionov, N.V. Sukhanova, I.S. Kabak, D.A. Alshinbaeva // IEEE Conference on Quality Management, Transport and Information Security, Information Technologies. - 2016. - P. 225-228.
  9. Sheptunov, S.A. Simulating of reliability of robotics system software on basis of artificial intelligence / S.A. Sheptunov, M.V. Larionov, N.V. Sukhanova, M.R. Salakhov, Y.M. Solomentsev, I.S. Kabak // IEEE Conference on Quality Manage-

ment, Transport and Information Security, Information Technologies. - 2016. - P. 193-197.  
10. Solomentsev, Yu.M. Assessing the reliability of CAD software by means of neural networks /

Yu.M. Solomentsev, I.S. Kabak, N.V. Sukhanova // Russian Engineering Research. - 2015. - Vol. 35. - № 12. - P. 879-882.

*Статья поступила в редакцию 6.07.18.*

*Рецензент: д.т.н., профессор*

*Барский А.Б.*

*Статья принята к публикации 14.08.18.*

#### Сведения об авторах:

**Суханова Наталия Вячеславовна**, к.т.н., доцент кафедры «Компьютерные системы управления» Московского государственного технологического университета «Станкин», e-mail: [N\\_v\\_sukhanova@mail.ru](mailto:N_v_sukhanova@mail.ru).

**Sukhanova Nataliya Vyacheslavovna**, Can. Sc. Tech, Assistant Prof. of the Dep. "Computer Management Systems", Moscow State Technological University "Stankin", e-mail: [N\\_v\\_sukhanova@mail.ru](mailto:N_v_sukhanova@mail.ru).