

Современные радиотехнические и телекоммуникационные системы

Modern radio engineering and telecommunication systems

УДК 621.396.69

<https://doi.org/10.32362/2500-316X-2021-9-4-98-112>

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

Алгоритм Кохонена в задачах классификации конструктивных дефектов печатных узлов

С.У. Увайсов^{*, 1, 2},
В.В. Черноверская¹,
Дао Ань Куан¹,
Нгуен Ван Туан¹

¹ МИРЭА – Российский технологический университет, Москва, 119454 Россия

² МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, 105005 Россия

* Автор для переписки, e-mail: uvaysov@yandex.ru

Резюме. Представлен оригинальный метод диагностирования технического состояния печатных узлов (ПУ) радиоэлектронных средств (РЭС), основанный на математическом моделировании тепловых процессов и сети Кохонена как инструменте классификации конструктивных дефектов ПУ. Показана структура метода и определен состав функциональных блоков. Реализация метода представляет собой сочетание математического моделирования состояний РЭС с физическими испытаниями и исследованием характеристик. Предлагаемый метод базируется на специализированных программных комплексах конструкторского и схемотехнического проектирования *Altium Designer*, *SolidWorks*, *NI Multisim*, *FloTHERM PCB*, а также пакетах математического моделирования. При помощи этих инструментов был проведен ряд исследований, в том числе получены наборы численных значений мощностей элементов схемы и температурных показателей печатного узла как для исправного состояния устройства, так и в состояниях с искусственно внесенными дефектами. На основе этих данных была сформирована база неисправностей электронного узла. Для реализации диагностических процедур и идентификации технического состояния создана искусственная нейронная сеть на основе самоорганизующихся карт Кохонена, определена ее структура, параметры и алгоритмы функционирования. Процедура диагностики базируется на анализе информации из базы неисправностей и ее сравнении с экспериментальными данными, полученными в результате физического эксперимента. Результаты исследования показали, что сеть автоматически классифицирует характерные дефекты электронных узлов с помощью заложенных в ней алгоритмов. Перечень характерных дефектов в предложенном методе диагностирования ограничен дискретным набором наиболее часто встречающихся неисправностей, поскольку при увеличении их числа применение самоорганизующейся сети Кохонена для классификации значительно усложняется и становится неэффективным по показателям производительности и достоверности идентификации. Из достоинств данной технологии следует отметить, что сеть Кохонена имеет возможность преобразовывать входные данные большой размерности в двумерный массив, поэтому результаты легко визуализировать и удобно использовать при формировании отчетов и рекомендаций для последующего принятия решения о возможности эксплуатации электронного устройства.

Ключевые слова: радиоэлектронное средство, техническая диагностика, моделирование, система автоматизированного проектирования, тепловое диагностирование, термограмма, самоорганизующаяся сеть, карта Кохонена, кластеризация, классификация, ЭРЭ

• Поступила: 09.05.2021 • Доработана: 17.05.2021 • Принята к опубликованию: 25.05.2021

Для цитирования: Увайсов С.У., Черноверская В.В., Дао Ань Куан, Нгуен Ван Туан. Алгоритм Кохонена в задачах классификации конструктивных дефектов печатных узлов. *Российский технологический журнал*. 2021;9(4):98–112. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2021-9-4-98-112>

Прозрачность финансовой деятельности: Никто из авторов не имеет финансовой заинтересованности в представленных материалах или методах.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

RESEARCH ARTICLE

Kohonen's algorithm in problems of classification of defects in printed circuit assemblies

Saygid U. Uvaysov^{*, 1, 2},
Viktoriya V. Chernoverskaya¹,
Dao An Kuan¹,
Nguyen Van Tuan¹

¹ MIREA – Russian Technological University, Moscow, 119454 Russia

² Bauman Moscow State Technical University, Moscow, 105005 Russia

* Corresponding author, e-mail: uvaysov@yandex.ru

Abstract. The article presents a new method for diagnosing the technical condition of radio-electronic components, combining the methods of thermal diagnostics with the technologies of artificial neural networks. The structure of the method is shown, and the composition of the functional blocks is determined. The implementation of the method is a symbiosis of technologies for mathematical and simulation modeling of the technical state of a radio-electronic device with its physical tests and research of characteristics. When developing the method, specialized software tools for design and circuit design were actively used, such as Altium Designer CAD, SolidWorks, NI Multisim, the FloTHERM PCB thermal analysis module, as well as the MATLAB mathematical modeling and calculation package. With the help of these tools, a number of studies were carried out, including sets of numerical values of the power of circuit elements and temperature indicators of the printing unit, both for the correct state of the device and in states with artificially introduced defects. They, in turn, became the basis of the database of electronic node failures. To implement diagnostic procedures and identify the technical condition, an artificial neural network based on self-organizing Kohonen maps was created, its structure, parameters and algorithms of functioning were determined. The diagnostic procedure is based on the analysis of information from the fault database and its comparison with experimental data obtained as a result of a physical experiment. The results of the study showed that the network automatically classifies the characteristic defects of electronic components using the algorithms embedded in it. The list of characteristic defects in the proposed diagnostic method is limited to a discrete set of the most common faults, because, as their number increases, the use of the self-organizing Kohonen network for automatic classification becomes much more complicated and ineffective in terms of performance and reliability of identification. Among the advantages of this technology, it should be noted that the Kohonen network has the ability to convert large-dimensional input data into a two-dimensional array. So, the results are easy to visualize and convenient to use when generating reports and recommendations for subsequent decision-making about the possibility of using an electronic device.

Keywords: radio-electronic equipment, electronic means, technical diagnostics, modeling, computer-aided design system, thermal diagnostics, thermogram, self-organizing network, Kohonen map, clustering, classification, electric radio element

• Submitted: 09.05.2021 • Revised: 17.05.2021 • Accepted: 25.05.2021

For citation: Uvaysov S.U., Chernoverskaya V.V., Dao An Kuan, Nguyen Van Tuan. Kohonen's algorithm in problems of classification of defects in printed circuit assemblies. *Rossiiskii tekhnologicheskii zhurnal = Russian Technological Journal*. 2021;9(4):98–112 (in Russ.). <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2021-9-4-98-112>

Financial disclosure: Authors have no a financial or property interest in any material or method mentioned.

The authors declare no conflicts of interest.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время сложно представить себе жизнь человека и развитие общества без глобального Интернета, инфокоммуникационных технологий и электронных устройств, которые предоставляют нам новые сервисы, обеспечивают комплексную автоматизацию производственных процессов, помогают в принятии решений. В связи с этим, на первый план выходят задачи обеспечения надежного и бесперебойного функционирования этой инфраструктуры, в т.ч. радиоэлектронных средств (РЭС), посредством которых реализуется заложенный в ней функционал.

Следует отметить, что современные РЭС сами являются сложными техническими системами, надежность характеристики которых формируются на всех этапах жизненного цикла, начиная с анализа технического задания, проходя сквозь стадии конструкторского проектирования, технологической подготовки, производства РЭС и его эксплуатации, вплоть до утилизации устройства. Вопросы обеспечения надежности тесно связаны с возможностью контроля и диагностики технического состояния РЭС на протяжении всего жизненного цикла, поэтому методы диагностирования эволюционируют вместе с развитием электроники. В современных методах, наряду с физическими испытаниями, активно применяются математическое и имитационное моделирование, вычислительные эксперименты, которые позволяют не только выявлять и идентифицировать дефекты в испытываемых узлах РЭС, но и прогнозировать их возникновение заранее, на этапах конструкторской разработки [1, 2]. Таким образом, появляется возможность снизить риски и устранить причины формирования скрытых дефектов РЭС с длительным латентным периодом. Еще одно направление развития теории и методов технической диагностики РЭС связано с сочетанием традиционных апробированных подходов с технологиями искусственных нейронных сетей, что дает ощутимый эффект с точки зрения повышения производительности методов, увеличения скорости обработки информации при выявлении неисправностей в узлах РЭС и достоверности их идентификации [3].

В настоящее время для диагностирования технического состояния узлов и модулей РЭС наряду с методами вибродиагностики применяются методы теплового диагностирования, основным анализируемым признаком которых являются показатели температуры в элементах и узлах РЭС, а также динамика их изменения [4, 5]. Изменение характера теплового излучения свидетельствует об изменении режима работы устройства. Как правило, увеличение интенсивности теплового излучения в элементах РЭС приводит к их локальным перегревам, которые могут свидетельствовать о наличии скрытого дефекта или структурной неоднородности. Своевременное обнаружение таких факторов позволит принять меры по предупреждению неисправностей и отказов РЭС [6, 7].

В данной статье представлен новый метод диагностирования дефектов печатных узлов РЭС, основанный на сочетании тепловой диагностики с применением самоорганизующейся сети Кохонена.

РАЗРАБОТКА МЕТОДА КЛАССИФИКАЦИИ ДЕФЕКТОВ ПЕЧАТНЫХ УЗЛОВ С ПРИМЕНЕНИЕМ АЛГОРИТМА КОХОНЕНА

Структурная схема метода диагностирования и классификации дефектов печатных узлов с применением алгоритма Кохонена показана на рис. 1. Исходные данные формируются из схемы электрической принципиальной (блок 1) и перечня элементов функционального узла РЭС, а с помощью специализированного программного обеспечения для электротехнического моделирования *NI Multisim* (блок 4) создается схемотехническая модель (блок 2), имитирующая работу схемы. Последующий инженерный анализ и расчеты (блок 3) позволяют получить значения мощностей тепловыделений электрорадиоэлементов (ЭРЭ) (блок 5). Эта информация вместе с перечнем характерных дефектов (блок 6) и тепловой моделью функционального узла РЭС (блок 8), созданной при помощи модуля *FloTHERM PCB* (блок 7б) на основе ранее подготовленной в САПР *Altium Designer* (блок 7а) конструкции печатного узла РЭС (блок 7) используется для исследования тепловых процессов, получения показателей



Рис. 1. Структурная схема классификации дефектов печатных узлов с применением сети Кохонена

нагрева ЭРЭ и карт распределения температур по поверхности печатного узла (блок 9). Результатом моделирования тепловых процессов является набор значений температур ЭРЭ, индивидуальный для каждого исследуемого состояния печатного узла. Полученные модельные данные передаются в блок предварительной обработки (блок 10), где из них формируется массив дискретных значений. Совокупность таких массивов служит основой для создания базы данных (БД) неисправностей РЭС (блок 11), структура и объем которой определяются конструктивной и функциональной сложностью исследуемого узла.

Разработанная БД неисправностей является исходной информацией для построения и обучения сети Кохонена (блок 12). В разработанном методе сеть Кохонена является ключевым инструментом диагностической процедуры, позволяющим точно классифицировать и идентифицировать дефекты, возникающие в печатном узле РЭС (блок 11).

В ходе физического эксперимента для получения значений температур в элементах печатного узла применяется тепловизионный прибор (блок 14), основная функция которого – определять и визуализировать тепловые поля исследуемого объекта. При проведении испытания с печатного узла РЭС (блок 13) при помощи тепловизора снимаются температурные показатели (блок 15). Для уменьшения экспериментальной погрешности и исключения грубых ошибок проводятся многократные равнозначные измерения. По результатам предварительной обработки экспериментальных данных для каждого исследуемого состояния РЭС формируется свой экземпляр

записи, представляющий собой массив дискретных значений температур ЭРЭ. После этого полученные данные передаются в блок прогнозирующей модели (блок 16), построенной на основе сети Кохонена, где осуществляется их сравнение с численными массивами, хранящимися в БД неисправностей. В соответствии с реализованным алгоритмом классификации происходит отнесение анализируемого экземпляра к определенному виду дефекта. На заключительном этапе предложенного метода формируется отчет о техническом состоянии испытуемого узла РЭС (блок 17).

АНАЛИЗ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СХЕМЫ УЗЛА РЭС В СРЕДЕ NI MULTISIM

Для проведения экспериментальных исследований была выбрана электрическая схема усилителя, для которой в среде *NI Multisim* создана схемотехническая модель (рис. 2). В ходе моделирования получены результаты функционирования схемы в нормальном режиме, которые представляются графиками зависимости выходных сигналов от сигналов на входе (рис. 3).

Для накопления экспериментальных данных и создания базы неисправностей исследуемого узла РЭС были смоделированы режимы работы схемы с искусственно внесенными в нее дефектами. Рассмотрены три случая: не работает транзистор Q3; не работает транзистор Q6; не работает составной транзистор Q8 (рис. 4). Для каждого случая выполнялось схемотехническое моделирование режима функционирования.

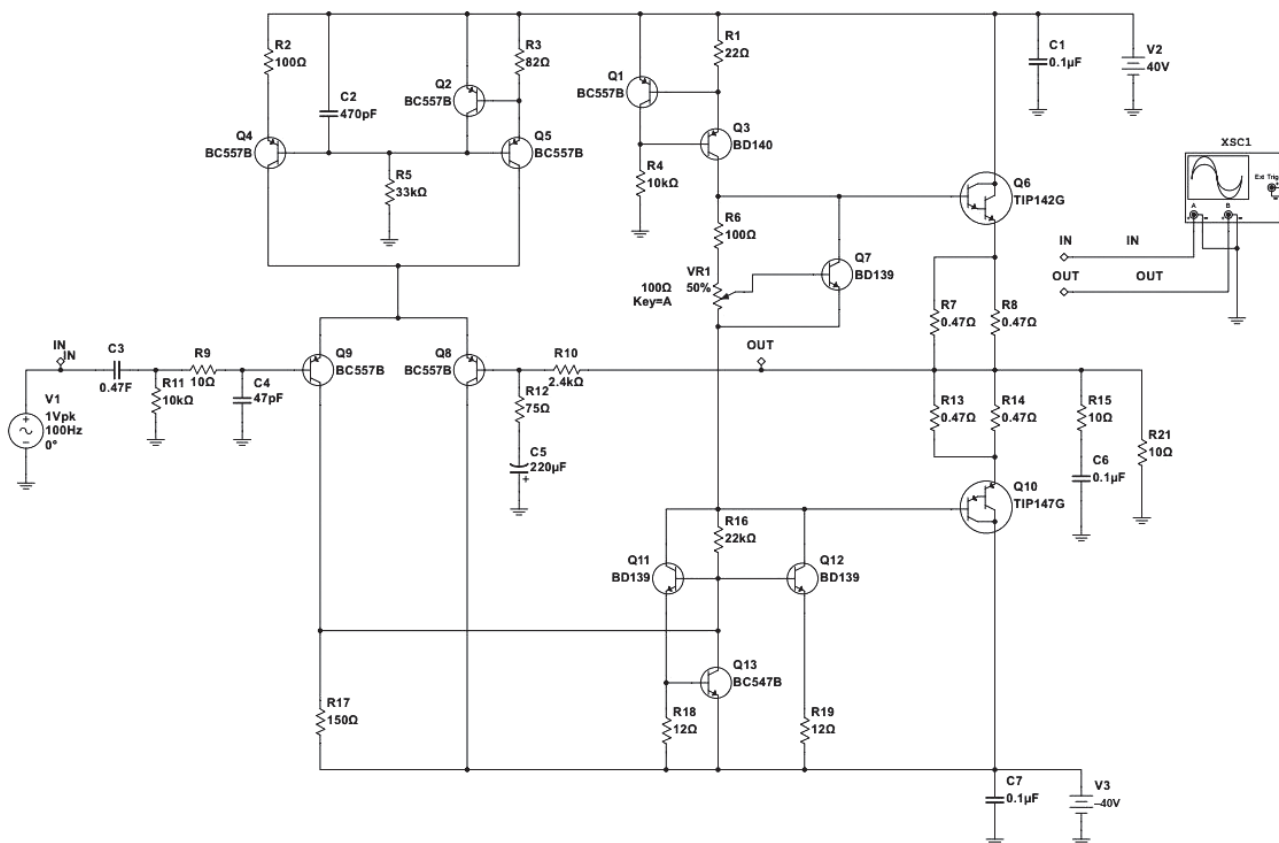


Рис. 2. Синтез электрической принципиальной схемы РЭС в среде Multisim

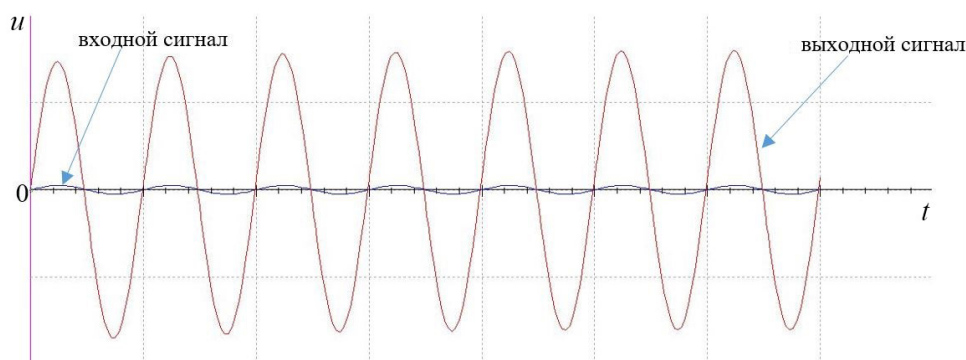


Рис. 3. Графики зависимости выходного сигнала от входного сигнала

Результаты моделирования в виде расчетных значений рассеиваемой мощности ЭРЭ приведены в табл. 1. Можно видеть серьезные отклонения значений параметров схемы с внесенными неисправностями от значений в нормальном (исправном) состоянии.

Следующим шагом исследования стал анализ температурных значений печатного узла усилителя, конструкция которого была предварительно разработана в специализированных САПР *Altium Designer* и *SolidWorks*, а тепловой анализ выполнен при помощи модуля *FloTHERM PCB*.

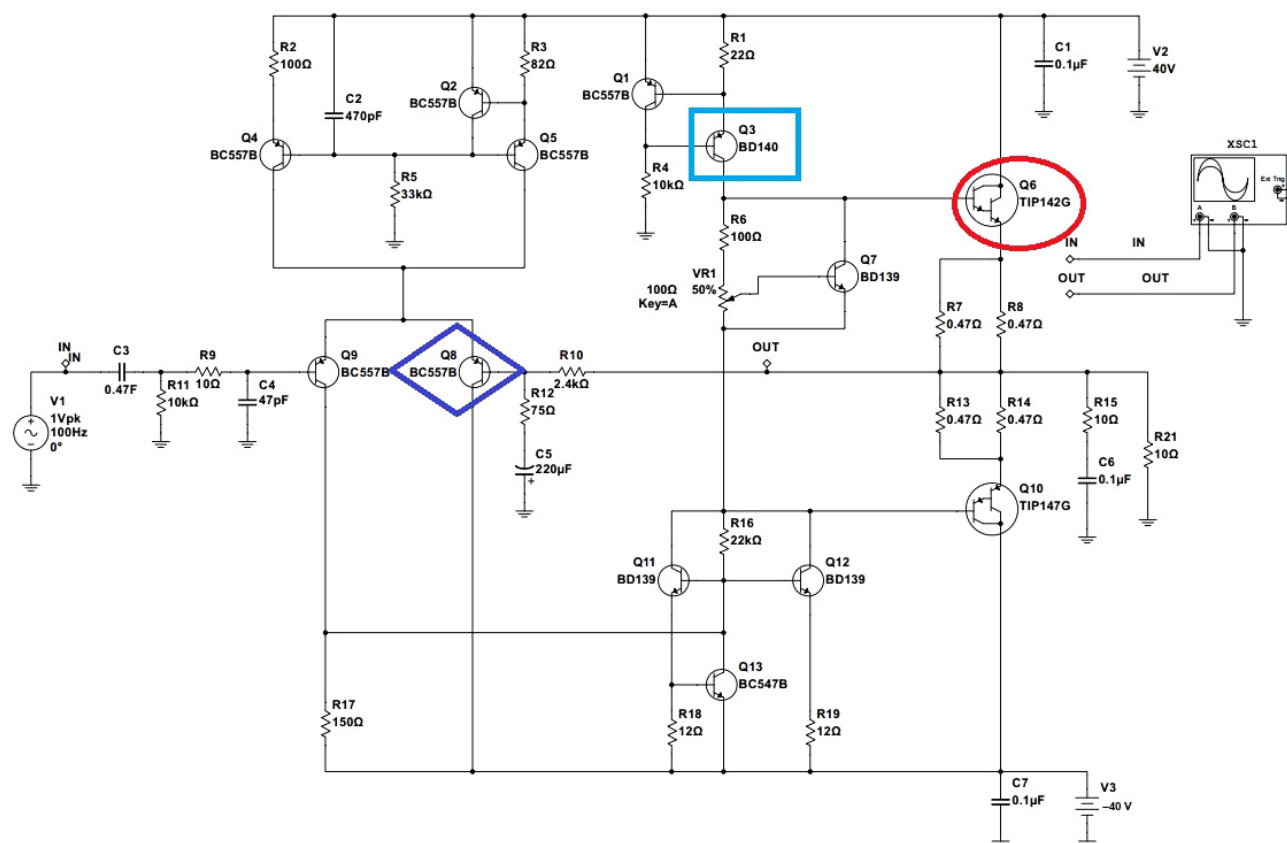


Рис. 4. Моделирование дефектов в электрической схеме РЭС

Таблица 1. Значения рассеиваемой мощности ЭРЭ для различных моделируемых состояний РЭС

ЭРЭ	Мощность ЭРЭ в нормальном режиме, $P_{\text{потр}}$, мВт	Мощность ЭРЭ (дефект в транзисторе Q3), $P_{\text{потр}}$, мВт	Мощность ЭРЭ (дефект в транзисторе Q6), $P_{\text{потр}}$, мВт	Мощность ЭРЭ (дефект в транзисторе Q8), $P_{\text{потр}}$, мВт
Q1	5.27	4.52	2.02	5.25
Q2	1.58	1.57	1.58	1.58
Q3	1240.00	0.00	628.00	2460.00
Q4	258.00	403.00	262.00	255.00
Q5	311.00	486.00	316.00	307.00
Q6	14700	0.00	0.00	0.00
Q7	49.40	0.00	20.00	51.30
Q8	428.00	281.00	515.00	0.00
Q9	169.00	86.40	74.40	592.00
Q10	14700	38600	11200	8530
Q11	558.00	0.00	165.00	3.25
Q12	558.00	0.00	165.00	3.25
R1	23.10	0.00	11.00	23.10
R2	4.50	4.47	4.50	4.49
R3	5.36	5.33	5.36	5.34
R4	149.00	0.00	151.00	149.00
R5	4.51	4.52	4.54	4.50

Окончание таблицы 1

ЭРЭ	Мощность ЭРЭ в нормальном режиме, $P_{\text{потр}}$, мВт	Мощность ЭРЭ (дефект в транзисторе Q3), $P_{\text{потр}}$, мВт	Мощность ЭРЭ (дефект в транзисторе Q6), $P_{\text{потр}}$, мВт	Мощность ЭРЭ (дефект в транзисторе Q8), $P_{\text{потр}}$, мВт
R6	19.20	0.00	11.90	19.30
R7	289.00	0.00	0.00	0.00
R8	289.00	0.00	0.00	0.00
R10	201.00	0.00	33.90	0.00
R13	316.00	557.00	105.00	1590.00
R14	316.00	557.00	105.00	1590.00
R15	2.00	0.00	0.00	0.00
R16	88.00	11.10	180.00	0.00
R17	4.95	0.00	3.11	6.19
R18	2.83	0.00	1.16	5.11
R19	2.83	0.00	1.16	5.11
VR1	19.00	0.00	11.8	19.00

ТЕПЛОВОЙ АНАЛИЗ ПЕЧАТНОГО УЗЛА РЭС В МОДУЛЕ FLOTHERM PCB

3D-модель печатного узла усилителя показана на рис. 5. После построения твердотельной модели в модуле *FloTHERM PCB* было проведено исследование тепловых характеристик для каждого диагностируемого состояния усилителя. Визуализация результатов моделирования в виде распределения температурных полей показана на рис. 6–9, а расчетные значения температур электрорадиоэлементов, установленных на печатном узле, – в табл. 2.

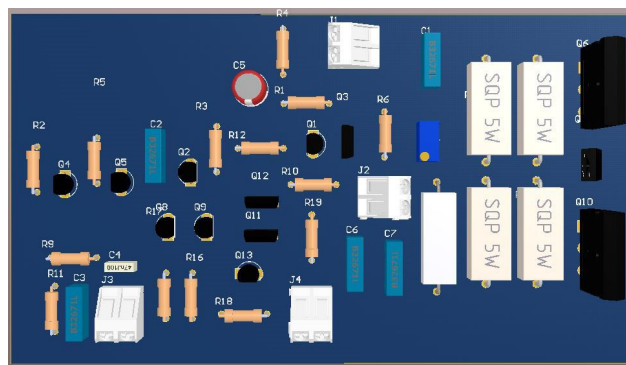


Рис. 5. 3D-модель печатного узла усилителя, созданная в САПР SolidWorks

Таблица 2. Температура ЭРЭ в печатном узле усилителя для различных моделируемых состояний РЭС

ЭРЭ	Температура ЭРЭ в исправном состоянии узла, °С	Температура ЭРЭ (неисправен транзистор Q3), °С	Температура ЭРЭ (неисправен транзистор Q6), °С	Температура ЭРЭ (неисправен транзистор Q8), °С
Q1	56.9	45.0	41.9	55.0
Q2	46.6	43.1	39.3	40.9
Q3	90.9	46.7	60.3	121
Q4	51.3	57.9	47.1	46.9
Q5	53.6	59.1	49.0	48.4
Q6	180	56.5	40.2	43.2
Q7	98.1	95.2	56.7	60.7
Q8	58.6	51.5	55.4	41.0
Q9	53.3	45.3	43.0	58.3
Q10	179.0	320.0	144.0	128.0

Окончание таблицы 1

ЭРЭ	Температура ЭРЭ в исправном состоянии узла, °C	Температура ЭРЭ (неисправен транзистор Q3), °C	Температура ЭРЭ (неисправен транзистор Q6), °C	Температура ЭРЭ (неисправен транзистор Q8), °C
Q11	65.4	40.7	43.3	40.0
Q12	67.0	41.5	44.1	42.1
R1	52.7	43.5	40	49.6
R2	42.8	45	38.5	38.6
R3	47.5	42.3	38.7	41.7
R4	50.2	41.4	40.7	46.1
R5	44.6	46.5	40	40.1
R6	60.7	51.5	42.8	56.5
R7	100.0	74.0	47.3	54.4
R8	79.1	66.5	44.7	53.5
R10	60.0	46.1	42.1	50.6
R13	98.9	133	69.7	87.1
R14	77.9	92.7	54.1	76.3
R15	63.1	68.2	45.8	58.1
R16	46.4	41.5	42.4	38.6
R17	43.8	41.0	39.2	37.6
R18	44.8	41.6	37.7	38.8
R19	52.7	46.0	39.8	45.0
VR1	63.3	57.9	43.0	53.4

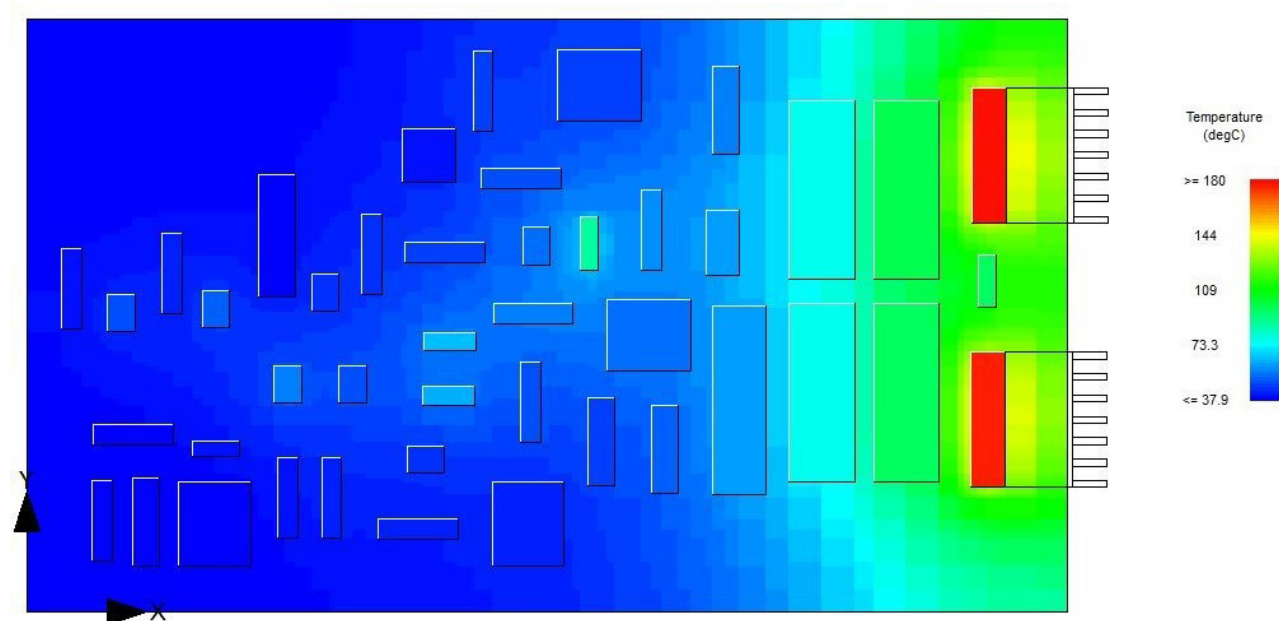


Рис. 6. Тепловое поле печатного узла усилителя в исправном состоянии

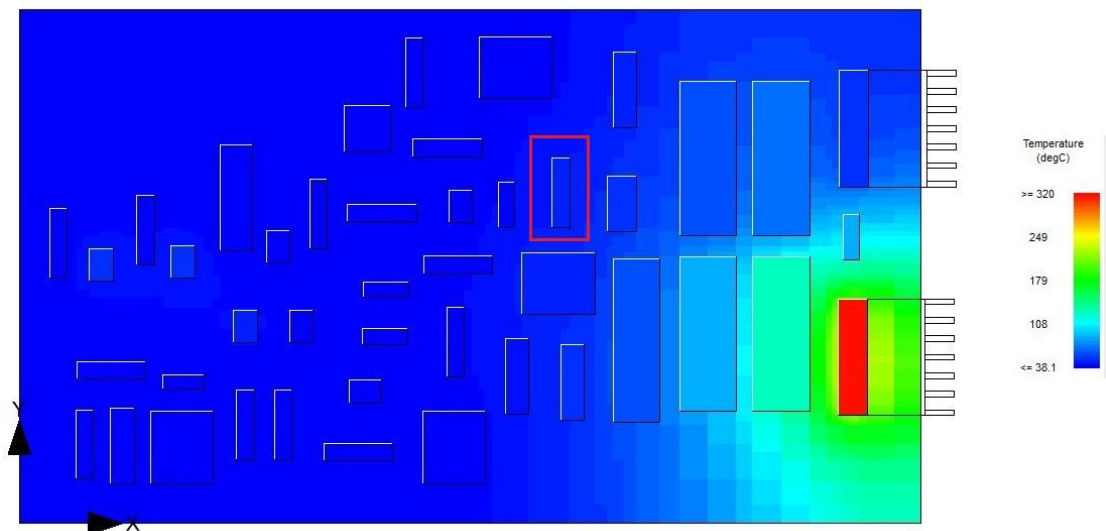


Рис. 7. Тепловое поле печатного узла усилителя при неисправном транзисторе Q3

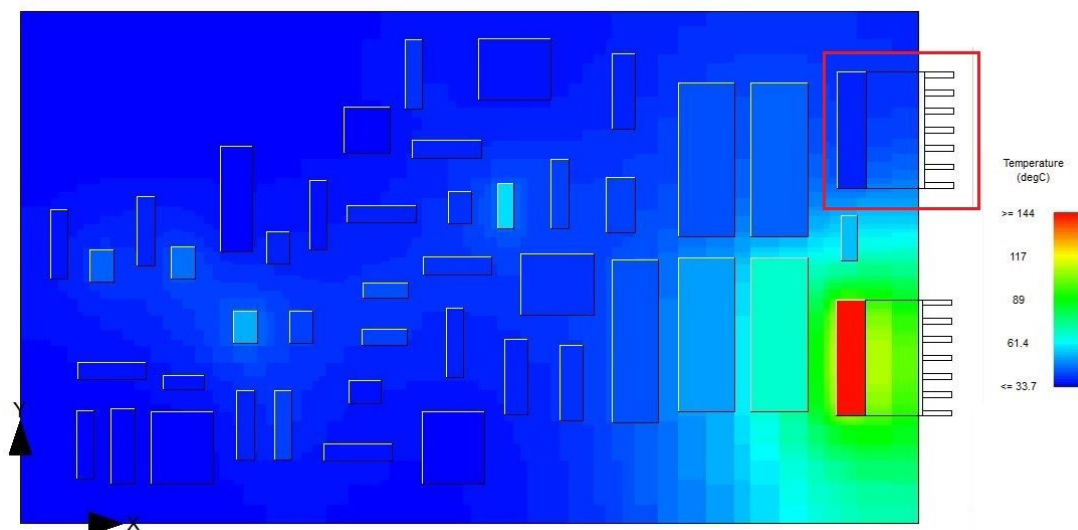


Рис. 8. Тепловое поле печатного узла усилителя при неисправном транзисторе Q6

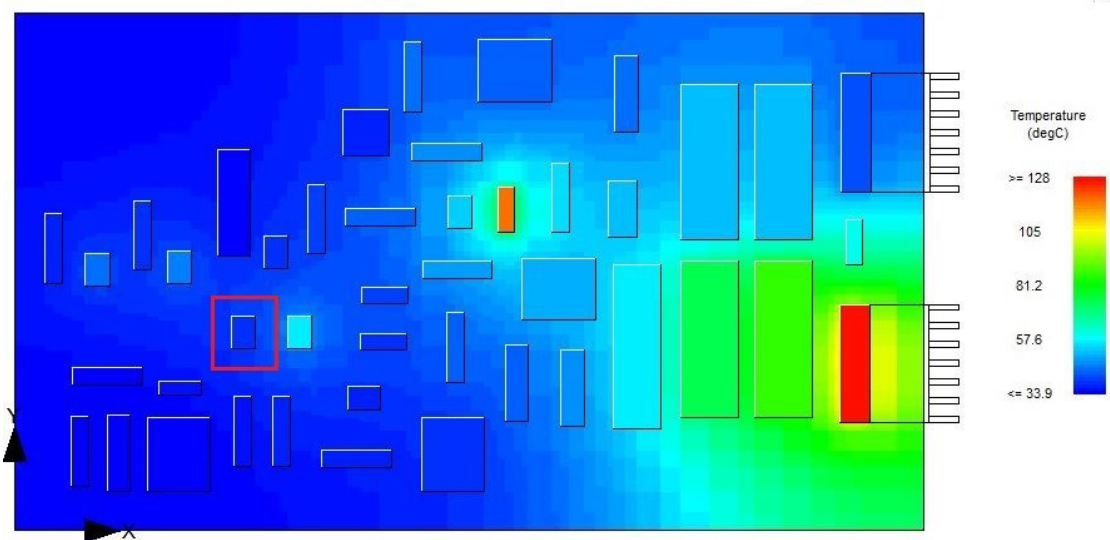


Рис. 9. Тепловое поле печатного узла усилителя при неисправном транзисторе Q8

Из табл. 2 видно, что, как и в случае схемотехнического моделирования, присутствует значительная разница температур ЭРЭ для печатного узла в исправном состоянии и узла с внесенными дефектами.

На следующем шаге исследования из данных, полученных в вычислительном эксперименте, была сформирована база неисправностей РЭС, которая в сочетании с алгоритмом Кохонена стала основой для классификации дефектов при диагностике технического состояния РЭС.

РАЗРАБОТКА ИСКУССТВЕННОЙ НЕЙРОННОЙ СЕТИ НА ОСНОВЕ САМООРГАНИЗУЮЩИХСЯ КАРТ КОХОНЕНА

Для диагностики технического состояния узлов РЭС разрабатывается искусственная нейронная сеть, в которой применена технология обучения без учителя (SOM). Такая сеть получила название самоорганизующейся. В картах самоорганизации (карты Кохонена) нейроны размещаются в узлах решетки, обычно одно- или двумерной. Все нейроны этой решетки связаны со всеми узлами входного слоя. Цель такой сети – кластеризация (автоматическая классификация) входных данных по схожим признакам. Кластеры, в свою очередь, определяются сетью на основе корреляции исходных данных [8, 9]. Важной особенностью самоорганизующейся сети является возможность преобразования большого числа входных данных в карту меньшей размерности на выходе (как правило, двумерную), т.е. создается двухуровневая архитектура на основе входного и выходного слоев. В такой сети нейроны группируются в виде матрицы и возбуждаются входным сигналом. Основой сети является механизм, который определяет степень сходства каждого нейрона с входным сигналом и вычисляет нейрон с максимальным

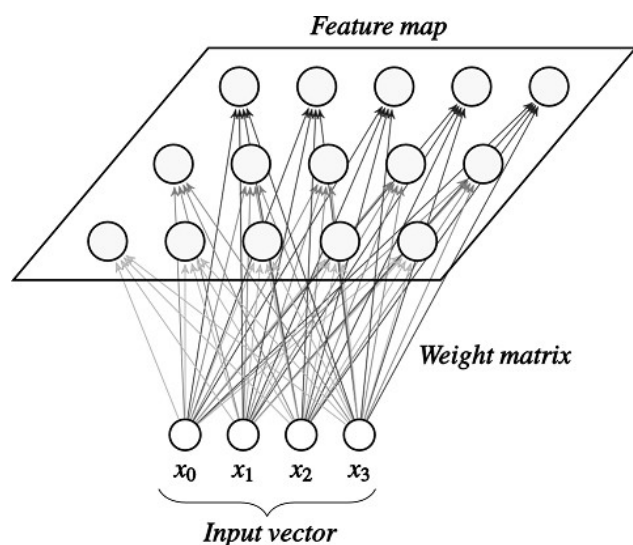


Рис. 10. Модель самоорганизующейся карты Кохонена

совпадением (нейрон-победитель). Входные блоки полностью соединены весами с выходным блоком (рис. 10) [10, 11].

Сеть имеет возможность адаптироваться к нейрону-победителю и его соседям, чтобы осуществлять самоорганизацию. Топология сети зависит от силы, с которой она реагирует на входные данные. Сеть считается организованной, если топологические соотношения между входными сигналами и их изображениями одинаковы [12, 13].

Алгоритм обучения самоорганизующейся сети включает пять основных шагов.

На предварительном этапе на вход сети подаются характерные идентификационные признаки.

Шаг 1. Инициализация – для всех векторов определяются синаптические веса:

$$\mathbf{W}_j = [w_{1j}, w_{2j}, \dots, w_{mj}],$$

где $j = 1, 2, \dots, l$; l – количество выходных нейронов; m – размерность входного вектора.

Шаг 2. Подбор – выбирается вектор $\mathbf{X} = [x_1, x_2, \dots, x_n]$ из входного пространства.

Шаг 3. Поиск победившего нейрона (ВМУ) в процессе конкуренции – находят наиболее подходящий (победивший) нейрон на шаге n , используя критерий минимума Евклидова расстояния:

$$d_{\text{ВМУ}} = \operatorname{argmin}_{j=1,2,\dots,l} (D_j) = \operatorname{argmin}_{j=1,2,\dots,l} \left(\sqrt{\sum_{i=1}^m (x_i - w_{ij})^2} \right).$$

Шаг 4. Процесс кооперации:

$$h_{i,j}(t) = \exp \left(-\frac{d_{i,j}^2}{2\sigma^2(t)} \right),$$

$$\sigma(t) = \sigma_0 \exp \left(-\frac{t}{\lambda} \right),$$

где $h_{i,j}(t)$ – монотонно убывающая функция соседства; $d_{i,j}$ – латеральное расстояние между победившим i -м и соседним j -м нейроном; $\sigma(t)$ – эффективная ширина; t – шаг обучения; σ_0 – начальное значение $\sigma(t)$; λ – некоторая константа (как правило, случайная величина, лежащая в интервале $[0; 1]$).

Шаг 5. Процесс адаптации кооперации:

$$w_j(t+1) = w_j(t) + \eta(t) h_{i,j}(t) (x_i - w_j(t)),$$

$$\eta(t) = \eta_0 \exp \left(-\frac{t}{\lambda} \right) \text{ – скорость обучения.}$$

После обновления весов происходит возврат к шагу 2, и цикл повторяется [9, 14].

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ПРОВЕРКА РАЗРАБОТАННОГО МЕТОДА

С учетом разброса геометрических и теплофизических параметров печатного узла методом статистических испытаний Монте-Карло создается база значений температур ЭРЭ. Эти числовые значения являются исходными данными для построения самоорганизующейся сети, их размерность равна 8000×29 , где $8000 = 4 \times 2000$ – массив значений, полученный на основе метода Монте-Карло для 4 состояний исследуемого узла (1 – исправное

и 3 – с дефектами), 29 – количество элементов в схеме. Размерность выходного слоя сети в каждом конкретном случае должна выбираться, исходя из требований по достоверности диагностирования и имеющихся вычислительных ресурсов. В данной работе на основе проведенных численных экспериментов выбрана размерность выходного слоя 10×10 [15]. Таким образом, количество нейронов на входе сети равно 8000, количество нейронов на выходе равно 100. Алгоритм разработанного метода для рассматриваемого примера представлен на рис. 11.

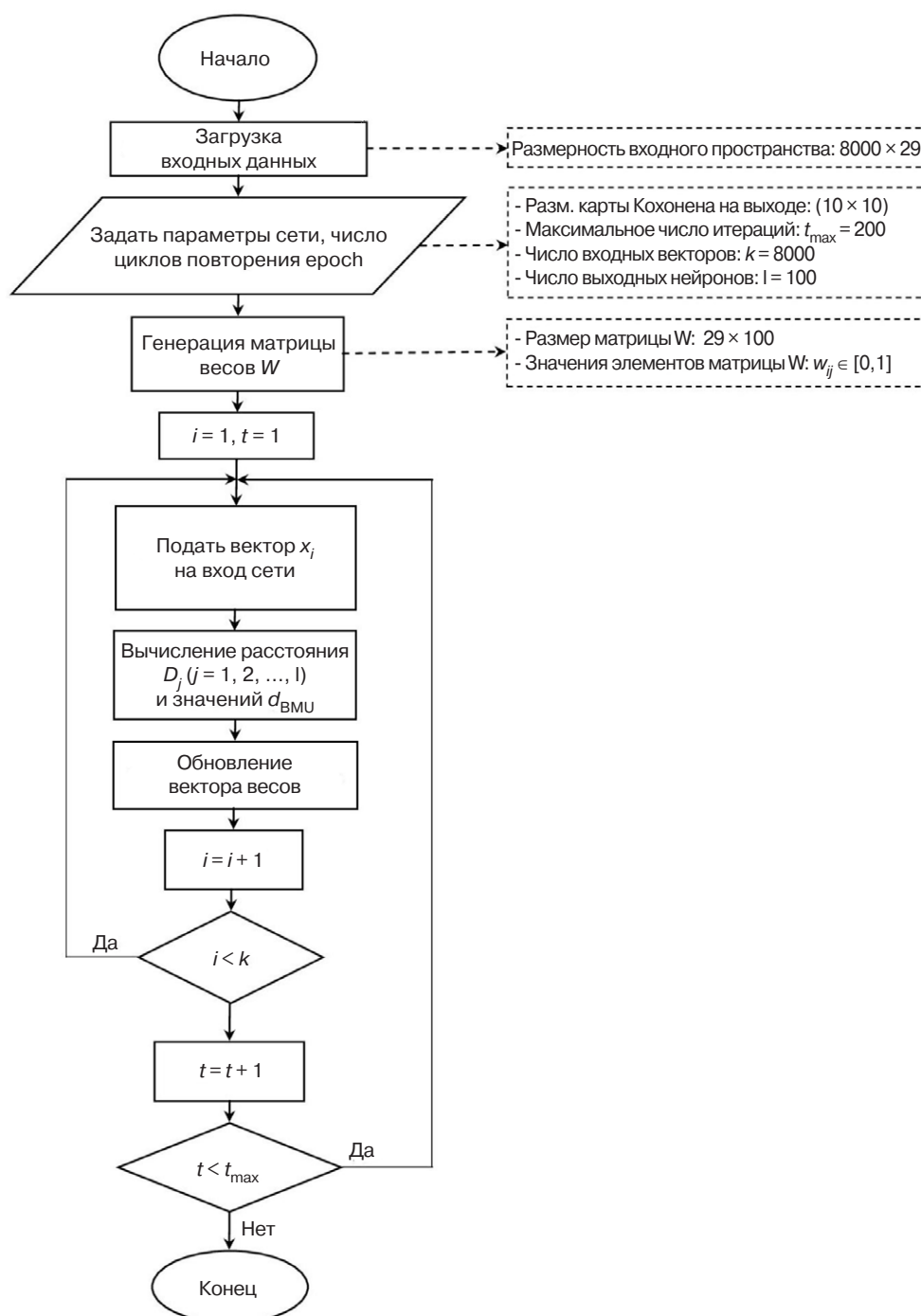


Рис. 11. Алгоритм обучения сети Кохонена для экспериментальной задачи

Дальнейший анализ проводится с применением ПО MATLAB, инструментарий которого позволяет создать сеть Кохонена (рис. 12).

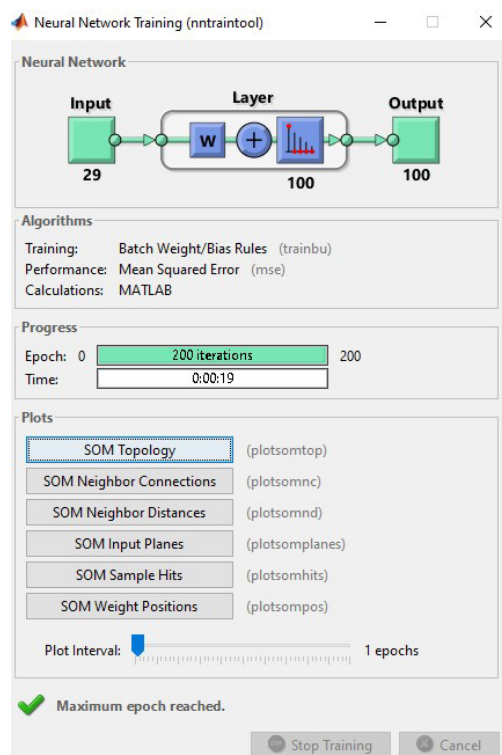


Рис. 12. Задание параметров самоорганизующейся сети в MATLAB

Результаты создания и обучения сети представлены на рис. 13–15. На рис. 13 показаны связи между нейронами на выходе.

На карте Кохонена связи между нейронами визуализируются интенсивностью цветовой окраски: чем темнее цвет, тем большее расстояние между нейронами, и наоборот (рис. 14).

В результате, из входной матрицы размерностью 8000×29 получена топология входных данных в двумерном пространстве. Входные векторы были разделены на четыре кластера (рис. 15).

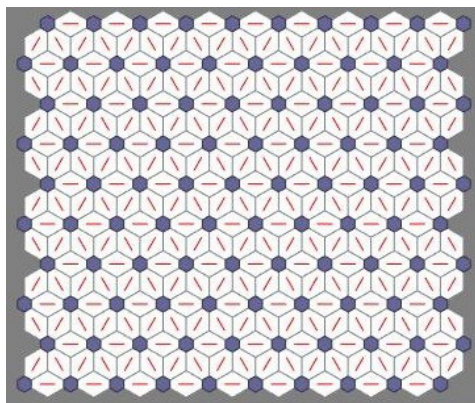


Рис. 13. Связи между соседними нейронами (som neighbor connection)

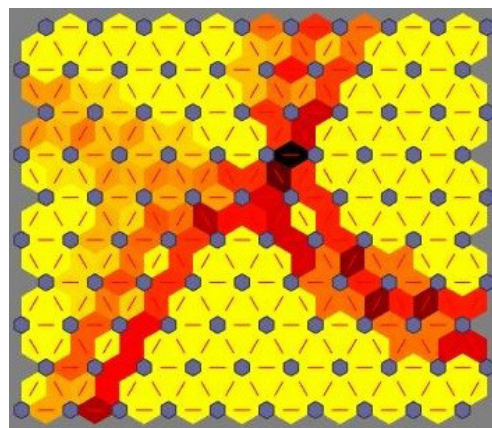


Рис. 14. Визуализация силы связей между нейронами

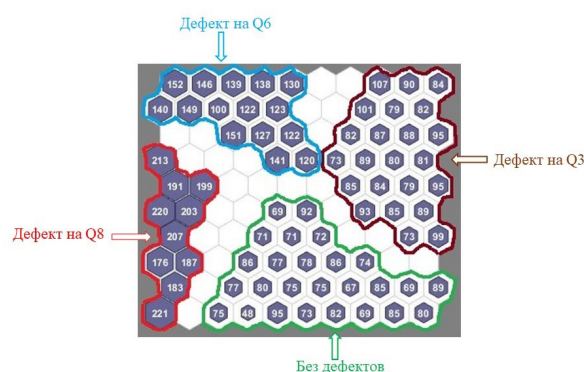


Рис. 15. Кластеризация узлов самоорганизованной карты Кохонена

Для проверки адекватности разработанной структуры и алгоритма работы сети Кохонена после окончания процедуры ее обучения на вход подавались тестовые векторы, которые формировались из значений температур элементов для различных состояний исследуемого печатного узла. Эти векторы находятся вне пространства обучающих данных. Результаты работы сети представлены на рис. 16. Как видно из рисунка, все тестовые структуры попадают в соответствующую зону и однозначно идентифицируются.

Проведенные исследования и полученные в работе результаты подтверждают научную гипотезу авторов о возможности применения алгоритма Кохонена в задаче классификации технического состояния электронных средств и позволяют рекомендовать разработанный метод для диагностирования конструктивных дефектов печатных узлов, приводящих к изменению температурного поля тестируемого устройства.

Дальнейшие исследования могут быть направлены на определение границ применимости предлагаемого метода, оценку влияния различных факторов на достоверность результатов диагностирования, на сравнительный анализ эффективности разработанного метода по сравнению с другими методами диагностики радиоэлектронных средств.

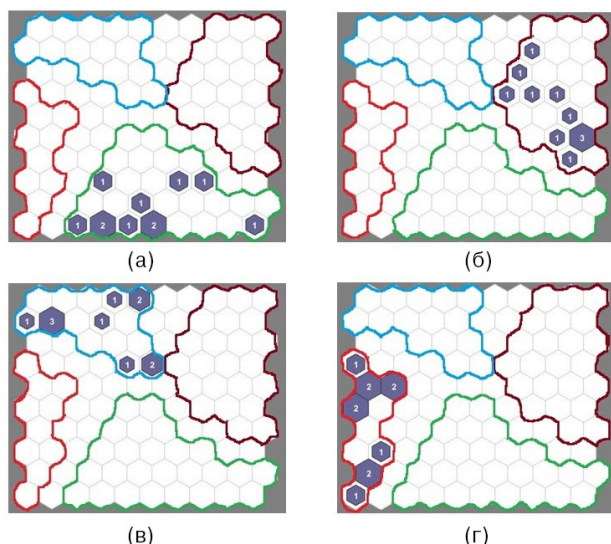


Рис. 16. Результат проверки сети после обучения:
(а) исправное состояние печатного узла;
(б) дефект на ЭРЭ Q3; (в) дефект на ЭРЭ Q6;
(г) дефект на ЭРЭ Q8

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статье рассмотрен новый метод диагностирования технического состояния узлов радиоэлектронных средств, сочетающий в себе тепловую диагностику с применением искусственной нейронной сети. Приведена структурная схема метода, описаны функциональные блоки, входящие в ее состав. Исследование характеристик РЭС, проводимое при помощи специализированного тепловизиального оборудования, дополнено математическим моделированием физических процессов, протекающих в схеме и конструкции электронного узла. Моделирование проводилось с использованием САПР конструкторского

и схемотехнического проектирования *Altium Designer*, *SolidWorks*, модулей *NI Multisim*, *FloTHERM PCB*, пакета *MATLAB*. В ходе исследования получены численные значения мощностей ЭРЭ и температур печатного узла в различных моделируемых состояниях устройства – исправном и в состояниях с внесенными дефектами. Полученные данные после предварительной обработки были преобразованы в массивы численных значений и размещены в базе данных неисправностей электронного узла. Для проведения автоматизированной диагностики и идентификации технического состояния РЭС создана искусственная нейронная сеть, определена ее структура, параметры и алгоритмы функционирования. В ее основе лежит самоорганизующаяся сеть Кохонена. Результаты вычислительного эксперимента показали, что сеть успешно справляется с задачей кластеризации дефектов электронного узла, когда их перечень ограничен дискретным набором наиболее часто встречающихся неисправностей, а при увеличении их числа применение механизмов, заложенных в сети Кохонена, существенно усложняется и становится неэффективным по характеристикам производительности и вероятности появления ошибок первого и второго рода при идентификации. Начатое исследование будет продолжено в направлении оптимизации применяемых алгоритмов, совершенствования диагностических процедур, повышения их достоверности с точки зрения предоставления корректной информации при принятии решения о возможности дальнейшей эксплуатации электронного устройства.

Вклад авторов. Все авторы в равной степени внесли свой вклад в исследовательскую работу.

Authors' contribution. All authors equally contributed to the research work.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Лышов С.М., Увайсов С.У., Черноверская В.В., Фам Лэ Куок Хань. Инженерная методика вибродиагностики конструкций бортовых радиоэлектронных средств. *Наукоемкие технологии*. 2020;21(2–3):17–29. <https://doi.org/10.18127/j19998465-202002-3-03>
2. Увайсов С.У., Черноверская В.В., Лышов С.М., Фам Лэ Куок Хань, Увайсова А.С. Искусственная нейронная сеть в задаче диагностики дефектов конструкций печатных узлов электронных средств. *Наукоемкие технологии*. 2020;21(10):29–39. <https://doi.org/10.18127/j19998465-202010-04>
3. Лышов С.М., Увайсов С.У., Черноверская В.В., Хань Ф.К. Метод вибродиагностики технического состояния конструкций электронных средств. *Российский технологический журнал*. 2021;9(2):44–56. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2021-9-2-44-56>
4. Меркухин Е.Н. Априорный критерий оценки эффективности оптимизации теплового режима путем рационального размещения электронных элементов.

REFERENCES

1. Lyshov S.M., Uvaysov S.U., Chernoverskaya V.V., Le Quok Han Pham. Engineering technique for vibrodiagnostics of structures on-board radio electronic means. *Naukoemkie tekhnologii = Science Intensive Technologies*. 2020;21(2–3):17–29 (in Russ.). <https://doi.org/10.18127/j19998465-202002-3-03>
2. Uvaysov S.U., Chernoverskaya V.V., Lyshov S.M., Le Quok Han Pham, Uvaysova A.S. Artificial neural network in the problem of diagnostics of defects in the construction of printed circuit components of electronic devices. *Naukoemkie tekhnologii = Science Intensive Technologies*. 2020;21(10):29–39 (in Russ.). <https://doi.org/10.18127/j19998465-202010-04>
3. Lyshov S.M., Uvaysov S.U., Chernoverskaya V.V., Han P.Q. Method of vibration diagnostics of the technical condition of electronic means structures. *Rossiiskii tekhnologicheskii zhurnal = Russian Technological Journal*. 2021;9(2):44–56 (in Russ.). <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2021-9-2-44-56>

- Современные наукоемкие технологии. 2018;10:77–81. URL: <http://top-technologies.ru/ru/article/view?id=37198>
5. Сергеева В.А., Тарасов Р.Г. Способ измерения тепловых параметров полупроводниковых изделий в составе электронного модуля. *Надежность и качество: труды международного симпозиума*. 2020;2:183–185.
6. Сулейманов С.П., Долматов А.В., Увайсов С.У. Тепловое диагностирование радиоэлектронных устройств. В сб.: «Радиовысотометрия – 2004»: тр. первой всероссийской научно-технической конф. Екатеринбург: Изд-во АМБ; 2004. С. 55–59.
7. Исаев С.С., Юрков Н.К. Методика тепловизионного контроля неисправностей печатных узлов РЭА на этапе производства. *Труды международного симпозиума «Надежность и качество»*. 2013;2:92–95. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/metodika-teplovizionnogo-kontrolya-neispravnostey-pechatnyh-uzlov-rea-na-etape-proizvodstva>
8. Валяев Е.А. Нейросетевой каскад на основе самоорганизующихся карт Кохонена. В сб.: *Сборник избранных статей по материалам научных конференций ГНИИ «НАЦРАЗВИТИЕ»*. СПб.: ГНИИ «Нацразвитие»; 2019. Ч. 2. С. 192–204.
9. Кохонен Т. *Самоорганизующиеся карты*: пер. с англ. М.: БИНОМ. Лаборатория знаний; 2008. 655 с. ISBN 978-5-94774-352-4
10. Tian J., Azarian M.H., Pecht M. Anomaly detection using self-organizing maps based *k*-nearest neighbor algorithm. In: *Proceedings of the European Conf. of the PHM Society*. 2014;2(1).
11. Горбаченко В.И., Ахметов Б.С., Кузнецова О.Ю. *Интеллектуальные системы: нечеткие системы и сети: учебное пособие для вузов*. М.: Юрайт; 2019. 105 с. ISBN 978-5-534-08359-0
12. Андрейчиков А.В., Андрейчикова О.Н. *Интеллектуальные информационные системы и методы искусственного интеллекта: учебник*. М.: ИНФРА-М; 2021. 530 с. ISBN 978-5-16-014883-0
13. Андрейчиков А.В., Андрейчикова О.Н. *Интеллектуальные цифровые технологии концептуального проектирования инженерных решений: учебник*. М.: ИНФРА-М; 2019. 511 с. ISBN 978-5-16-014884-7
14. Хайкин С. *Нейронные сети: полный курс*. М.: Вильямс; 2006. 1104 с.
15. Beale M.H., Hagan M.T., Demuth H.B. *Neural Network Toolbox. User's Guide*. Natick: Math Works, Inc.; 2015. 406 p.
4. Merkurkhin E.N. A priori criteria of evaluation effectiveness optimization of thermal mode the rational placement of electronic elements. *Sovremennye naukoemkie tekhnologii* = *Modern High Technologies*. 2018;10:77–81 (in Russ.). Available from URL: <http://top-technologies.ru/ru/article/view?id=37198>
5. Sergeeva V.A., Tarasov R.G. Method for measuring thermal parameters of semiconductor products as part of an electronic module. *Trudy Mezhdunarodnogo simpoziuma "Nadezhnost' i kachestvo" = Proceedings of the International Symposium "Reliability and Quality"*. 2020;2:183–185 (in Russ.).
6. Suleimanov S.P., Dolmatov A.V., Uvaisov S.U. Warm diagnostics of radio-electronic devices. In: *Konferentsiya "Radiovysotometriya – 2004" (Radio Altimetry – 2004: Proceedings of First All-Russian scientific conf.)*. Ekaterinburg: Izd-vo AMB; 2004, p. 55–59. (in Russ.).
7. Isaev S.S., Yurkov N.K. Technique of thermal imaging control of faults in printed circuit assemblies of electronic equipment at the production stage. *Trudy Mezhdunarodnogo simpoziuma "Nadezhnost' i kachestvo" = Proceedings of the International Symposium "Reliability and Quality"*. 2013;2:92–95 (in Russ.). Available from URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/metodika-teplovizionnogo-kontrolya-neispravnostey-pechatnyh-uzlov-rea-na-etape-proizvodstva>
8. Valyaev E.A. Neural network cascade based on self-organizing Kohonen maps. In: *Sbornik izbrannykh statei po materialam nauchnykh konferentsii GNII "NATSRAZVITIE" (Themed collection of papers from international conferences by HNRI "National Development")*. St. Petersburg: GNII "Natsrazvitie"; 2019. Part 2, p. 192–204. (in Russ.).
9. Kohonen T. *Self-organizing maps*. Verlag, Heidelberg: Springer; 2001. 502 p. [Kohonen T. *Samoorganizuyushchiesya karty (Self-organizing maps)*. Moscow: BINOM. Laboratoriya znaniy; 2008. 655 p. (in Russ.).]
10. Tian J., Azarian M.H., Pecht M. Anomaly detection using self-organizing maps based *k*-nearest neighbor algorithm. In: *Proceedings of the European Conf. of the PHM Society*. 2014;2(1).
11. Gorbachenko V.I., Akhmetov B.S., Kuznetsova O.Yu. *Intellektual'nye sistemy: nechetkie sistemy i seti: uchebnoe posobie dlya vuzov (Intelligent systems: fuzzy systems and networks: a textbook for universities)*. Moscow: Yurait; 2019. 105 p. (in Russ.). ISBN 978-5-534-08359-0
12. Andreichikov A.V., Andreichikova O.N. *Intellektual'nye informatsionnye sistemy i metody iskusstvennogo intellekta: uchebnik (Intelligent information systems and artificial intelligence methods: textbook)*. Moscow: INFRA-M; 2021. 530 p. ISBN 978-5-16-014883-0
13. Andreichikov A.V., Andreichikova O.N. *Intellektual'nye tsifrovye tekhnologii kontseptual'nogo proektirovaniya inzhenernykh reshenii: uchebnik (Intelligent digital technologies for conceptual design of engineering solutions: textbook)*. Moscow: INFRA-M; 2019. 511 p. ISBN 978-5-16-014884-7

14. Haykin S. *Neural networks*. Prentice Hall, NJ: Upper Saddle River; 1999. 938 p.
[Haykin S. *Neironnye seti: polnyi kurs (Neural networks: a complete course)*. Moscow: Vil'yams; 2008. 1103 p. (in Russ.). ISBN 978-5-8459-0890-2]
15. Beale M.H., Hagan M.T., Demuth H.B. *Neural Network Toolbox. User's Guide*. Natick: Math Works, Inc.; 2015. 406 p.

Об авторах

Увайсов Сайгид Увайсович, д.т.н., профессор, заведующий кафедрой конструирования и производства радиоэлектронных средств Института радиотехнических и телекоммуникационных систем ФГБОУ ВО МИРЭА – Российский технологический университет (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). E-mail: uvajsov@mirea.ru. Scopus Author ID 55931417100, ResearcherID H-6746-2015, <https://orcid.org/0000-0003-1943-6819>

Черновверская Виктория Владимировна, к.т.н., доцент, кафедра конструирования и производства радиоэлектронных средств Института радиотехнических и телекоммуникационных систем ФГБОУ ВО МИРЭА – Российский технологический университет (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). E-mail: chernoverskaya@mirea.ru.

Дао Ань Куан, аспирант, кафедра конструирования и производства радиоэлектронных средств Института радиотехнических и телекоммуникационных систем ФГБОУ ВО МИРЭА – Российский технологический университет (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). E-mail: anhquan.hvu@gmail.com.

Нгуен Ван Туан, аспирант, кафедра конструирования и производства радиоэлектронных средств Института радиотехнических и телекоммуникационных систем ФГБОУ ВО МИРЭА – Российский технологический университет (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). E-mail: tuanmya2pkkq@gmail.com.

About the authors

Saygid S. Uvaysov, Dr. Sci. (Eng.), Head of Department of Design and Production of Radio-Electronic Means, Institute of Radio Engineering and Telecommunication Systems, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454 Russia). E-mail: uvajsov@mirea.ru. ResearcherID H-6746-2015, Scopus Author ID 55931417100, <https://orcid.org/0000-0003-1943-6819>

Viktoriya V. Chernoverskaya, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Department of Design and Production of Radio-Electronic Means, Institute of Radio Engineering and Telecommunication Systems, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454 Russia). E-mail: chernoverskaya@mirea.ru.

Dao An Kuan, Postgraduate Student, Department of Design and Production of Radio-Electronic Means, Institute of Radio Engineering and Telecommunication Systems, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454 Russia). E-mail: anhquan.hvu@gmail.com.

Nguyen Van Tuan, Postgraduate Student, Department of Design and Production of Radio-Electronic Means, Institute of Radio Engineering and Telecommunication Systems, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454 Russia). E-mail: tuanmya2pkkq@gmail.com.